

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

**DIAGNÓSTICOS PREDITIVOS EMBASADOS NA
MODELAGEM DE UM GERADOR APLICADOS NO
MONITORAMENTO DA OPERAÇÃO**

Felipe Atanásio de Sales

Itajubá, dezembro de 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Felipe Atanásio de Sales

**DIAGNÓSTICOS PREDITIVOS EMBASADOS NA
MODELAGEM DE UM GERADOR APLICADOS
NO MONITORAMENTO DA OPERAÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica**

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Benedito Isaias Lima Fuly

Coorientador: Prof. Dr. Délvio Franco Bernardes

Itajubá, dezembro de 2018



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

ANEXO I

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Título da Dissertação: **“Diagnósticos Preditivos Embasados na Modelagem de um Gerador Aplicados no Monitoramento da Operação”**

Autor: **Felipe Atânasio de Sales**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
	A = Aprovado - R = Reprovado	
1º	A	
2º	A	
3º	A	
4º	A	
5º	A	

Observações:

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado (A) se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
(2) O Trabalho será considerado Reprovado (R) se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
Este documento terá a validade de 30 (trinta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

Resultado Final: Conceito final: A, ou seja, aprovado
Observações: _____

Itajubá, 06 de dezembro de 2018.

Prof. Dr. Jocélio Souza de Sá
1º Examinador - INATEL

Prof. Dr. José Carlos Grilo Rodrigues
2º Examinador – UNIFEI

Prof. Dr. Angelo José Junqueira Rezek
3º Examinador- UNIFEI

Prof. Dr. Délvio Franco Bernardes
4º Examinador (Coorientador) – SD Soluções

Prof. Dr. Benedito Isaías Lima Fuly
5º Examinador (Orientador) - UNIFEI

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por me dar forças e capacidade de realizar este trabalho.

À Santa Rita de Cássia, padroeira da minha comunidade.

Aos meus orientadores, professores Dr. Benedito Isaias Lima Fuly e Dr. Délvio Franco Bernardes por terem me aceitado como aluno, pela amizade, paciência e pelas orientações na realização deste trabalho.

Aos meus pais pelo amor, compreensão, suporte em todos momentos, que sempre me incentivaram e apoiaram minhas decisões, torcendo pelo meu sucesso.

Agradeço ao João Guimarães pela ajuda na ingresso do Mestrado.

Agradeço ao Fábio Kashiwagi pela amizade, companheirismo e ensinamentos durante todo o trabalho.

Aos meus familiares e amigos que foram essenciais nessa trajetória, contribuindo direta ou indiretamente, mesmo sem perceber.

Ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL, por promover projetos de pesquisa que propiciam a integração da Universidade com os agentes do setor elétrico.

Agradeço ao CNPq pela ajuda financeira neste período do trabalho.

*“Combati o bom combate, terminei minha corrida, guardei a fé.
Agora só me resta a coroa da justiça que o Senhor, justo juiz, me dará naquele dia;
e não somente a mim, mas também a todos os que aguardam com amor sua manifestação”*

(Segunda Carta à Timóteo, capítulo 4: 7-8)

Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia de monitoramento de geradores e sistemas de excitação estática, por meio de análises das condições elétricas. Os modelos foram implementados em duas usinas localizadas no sul do Brasil. Os geradores síncronos são elementos essenciais no sistema elétrico de potência. Assim, mediante um acompanhamento destas máquinas, possibilita-se a prévia detecção de possíveis falhas, a fim de garantir a confiabilidade do fornecimento de energia, estabilidade do sistema e redução das atividades de manutenção, que resultam em paradas não-programadas. A modelagem virtual foi desenvolvida com as características eletromagnéticas dos equipamentos, dados de fabricantes e teste de desempenho. Simultaneamente, demonstra-se a aplicação da técnica Planejamento de experimentos (*DOE – Design of experiments*) nos testes de monitoramento desenvolvidos nas usinas. Esta fornece com objetividade um procedimento para avaliação dos fatores mais significativos para uma determinada resposta, definição de melhores áreas de atuação e condições operacionais de um processo. Os resultados demonstram sua eficácia, ao contribuir para a otimização das atividades de manutenção.

Palavras-chave: Gerador, sistema de excitação, monitoramento, planejamento, otimização da manutenção.

Abstract

This work presents a methodology for the monitoring of generators and static excitation systems, through analysis of the electrical conditions. The models were implemented in two plants located in the south of Brazil. Synchronous generators are essential elements in the power system. Thus, by monitoring these machines, it is possible to detect possible faults in order to guarantee the reliability of the power supply, the stability of the system and the reduction of maintenance activities, which result in unscheduled shutdowns. The virtual modeling was developed with the electromagnetic characteristics of the equipments, data of manufacturers and performance test. Simultaneously, the application of the Design of Experiments (DOE) technique is demonstrated in the monitoring tests carried out at the plants. It provides objectively a procedure for evaluating the most significant factors for a particular response, defining the best operating areas and operating conditions of a process. The results demonstrate its effectiveness, by contributing to the optimization of maintenance activities.

Keywords: Generator, excitation system, monitoring, planning, maintenance optimization.

Lista de Figuras

Figura 1 - Empreendimentos em Operação – Potência (%).	13
Figura 2 - Processo de geração de energia.	15
Figura 3 - Usina Foz do Chapecó.	16
Figura 4 - Usina Campos Novos.....	17
Figura 5 - Fluxograma genérico dos testes realizados.	21
Figura 6 - Fluxograma do teste de desequilíbrio de tensão.	24
Figura 7 - Fluxograma do teste de monitoramento da temperatura de operação do transformador de excitação.	27
Figura 8 - Fluxograma do teste de monitoramento de operação do sistema de excitação.....	29
Figura 9 - Fluxograma do teste de monitoramento da temperatura de operação das pontes.	34
Figura 10 - Fluxograma do teste de monitoramento da temperatura o núcleo do estator.	36
Figura 11 - Fluxograma do teste de monitoramento do circuito de magnetização.	38
Figura 12 - Característica da resistência do rotor (Ohm) em função da temperatura (°C).	41
Figura 13 - Fluxograma do teste de monitoramento de operação da temperatura do rotor.	42
Figura 14 - Rendimento em função da potência ativa [MW] fornecida pelo gerador.....	45
Figura 15 - Fluxograma do teste de monitoramento do circuito hidráulico.	51
Figura 16 - Aberturas do distribuidor em função do sinal de controle.....	53
Figura 17 - Modelo Geral de um Processo ou Sistema.	57
Figura 18 - a) Gráfico de Pareto e b) Gráfico Normal de Probabilidade para <i>Delta_1</i>	65
Figura 19 - a) Gráfico de Pareto e b) Gráfico Normal de Probabilidade para <i>Delta_2</i>	67
Figura 20 - a) Gráfico de Pareto e b) Gráfico Normal de Probabilidade para <i>Delta_3</i>	68
Figura 21 - a) Gráfico de Superfície e b) Gráfico de Contorno para <i>Delta_1</i>	70
Figura 22 - a) Gráfico de Superfície e b) Gráfico de Contorno para <i>Delta_2</i>	71
Figura 23 - a) Gráfico de Superfície e b) Gráfico de Contorno para <i>Delta_3</i>	72
Figura 24 - a) Gráfico de Pareto e b) Gráfico Normal de Probabilidade para <i>Temp_Rotor</i>	74
Figura 25 - a) Gráfico de Superfície e b) Gráfico de Contorno para <i>Temp_Rotor</i>	75
Figura 26 - Gráfico de Otimização para <i>Temp_Rotor</i>	76
Figura 27 - a) Gráfico de Pareto e b) Gráfico Normal de Probabilidade para <i>Delta_PM</i>	78
Figura 28 - a) Gráfico de Superfície e b) Gráfico de Contorno para <i>Delta_PM</i>	80
Figura 29 - Gráfico de Otimização para <i>Delta_PM</i>	80
Figura 30 - a) Gráfico de Pareto e b) Gráfico Normal de Probabilidade para <i>Percent_Um</i>	82
Figura 31 - Gráfico de Otimização para <i>Percent_Um</i>	83

Lista de tabelas

Tabela 1 - Empreendimentos em Operação.....	13
Tabela 2 - Legenda dos Empreendimentos em Operação	14
Tabela 3 - Dados Técnicos	18
Tabela 4 - Reatâncias Equivalentes.....	18
Tabela 5 - Circuito do Rotor.....	18
Tabela 6 - Temperaturas de Operação.....	19
Tabela 7 - Sistema de Excitação	19
Tabela 8 - Transformador de Excitação	19
Tabela 9 - Problema identificado e ação de manutenção recomendada	22
Tabela 10 - Teste de desequilíbrio de tensão	23
Tabela 11 - Teste da operação do transformador de excitação	27
Tabela 12 - Teste da operação do sistema de excitação	28
Tabela 13 - Teste da temperatura de operação das pontes.....	33
Tabela 14 - Teste da temperatura de operação do núcleo do estator	35
Tabela 15 - Teste do circuito de magnetização.....	38
Tabela 16 - $R_{rotor} = f(Temp)$	41
Tabela 17 - Teste da temperatura do rotor.....	42
Tabela 18 - Rendimento x Potência	46
Tabela 19 - $AbeD \times Peixo$	49
Tabela 20 - Equações linearizadas de <i>Peixo</i>	50
Tabela 21 - Teste da operação do circuito hidráulico	50
Tabela 22 - Características das principais técnicas de planejamento de experimentos	60
Tabela 23 - Matriz de experimentos para o teste de desequilíbrio de tensão.....	63
Tabela 24 - <i>Valores-P</i> para Δ_1	64
Tabela 25 - <i>Valores-P</i> para Δ_2	65
Tabela 26 - <i>Valores-P</i> para Δ_3	67
Tabela 27 - Matriz de experimentos para o teste da temperatura do rotor	73
Tabela 28 - <i>Valores-P</i> para $Temp-Rotor$	73
Tabela 29 - Matriz de experimentos para o teste da operação do circuito hidráulico	77
Tabela 30 - <i>Valores-P</i> para Δ_{PM}	77
Tabela 31 - Matriz de experimentos para o teste da operação do circuito de magnetização	81
Tabela 32 - <i>Valores-P</i> para $Percent_{Um}$	81

Lista de abreviaturas e siglas

<i>AbeD</i>	Abertura percentual do distribuidor
<i>AngDBit</i>	Valor de corrente correspondente à AbeD
<i>Alfa</i>	Ângulo de disparo dos tiristores em graus
<i>Alfa_Rad</i>	Ângulo de disparo dos tiristores, em radianos
<i>Alerta_DeseqTensao</i>	Indicação de problema de desequilíbrio de tensão
<i>Alerta_ErroCaptacao</i>	Indicação de problema no circuito hidráulico
<i>Alerta_Magnetizacao</i>	Indicação de problema no circuito de magnetização
<i>Alerta_SistExc</i>	Indicação de problema no sistema de excitação
<i>Alerta_TempCampo</i>	Indicação de problema de sobretemperatura no campo
<i>Alerta_TempNE1</i>	Indicação de sobretemperatura no núcleo do estator 1
<i>Alerta_TempNE2</i>	Indicação de sobretemperatura no núcleo do estator 2
<i>Alerta_TempNE3</i>	Indicação de sobretemperatura no núcleo do estator 3
<i>Alerta_TempNE4</i>	Indicação de sobretemperatura no núcleo do estator 4
<i>Alerta_TempPonte1</i>	Indicação de sobretemperatura na ponte 1
<i>Alerta_TempPonte2</i>	Indicação de sobretemperatura na ponte 2
<i>AlertaTTE</i>	Indicação de sobretemperatura no transformador de excitação
<i>ANEEL</i>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>ANOVA</i>	Análise de Variância
<i>BIG</i>	Banco de Informações da Geração
<i>Cosseno_Alfa</i>	Cosseno do ângulo de disparo
<i>CBM</i>	<i>Condition Based Maintenance</i>
<i>Delta1</i>	Diferença entre as tensões U_{ab} e U_{bc} , dividida pela tensão média nos terminais do gerador;
<i>Delta2</i>	Diferença entre as tensões U_{ab} e U_{ca} , dividida pela tensão média nos terminais do gerador;
<i>Delta3</i>	Diferença entre as tensões U_{bc} e U_{ca} , dividida pela tensão média nos terminais do gerador;
<i>Delta_H</i>	Queda bruta
<i>Delta_PM</i>	Diferença relativa entre as potências mecânicas
<i>Delta_Ufc</i>	Módulo da diferença de tensão entre U_{fc} e U_{fBit}
<i>Desvio_IL</i>	Valor pu limite de desequilíbrio
<i>DOE</i>	Design of Experiments

<i>H1Bit</i>	Altura de montante
<i>H2Bit</i>	Altura de jusante
<i>H_Ensaio</i>	Altura do ensaio
<i>IAIfaBit</i>	Valor de corrente correspondente ao ângulo de disparo
<i>IHM</i>	Interface Homem Máquina
<i>Kten</i>	Relação de transformação nominal do transformador de excitação
<i>Ktec</i>	Relação de transformação calculada do transformador de excitação
<i>MSR</i>	Metodologia de Superfície de Resposta
<i>ONS</i>	Operador Nacional do Sistema
<i>Parametro_a</i>	Parâmetro proporcional da reta de <i>Alfa</i>
<i>Parametro_b</i>	Parâmetro linear da reta de <i>Alfa</i>
<i>PBit</i>	Potência ativa atual
<i>PCC</i>	Planejamento Composto Central
<i>Peixo</i>	Potência mecânica para queda bruta
<i>Percent_Delta_Kten</i>	Valor <i>pu</i> limite de erro no transformador de excitação
<i>Percent_Delta_PM</i>	Valor <i>pu</i> limite de diferença entre <i>PMP</i> e <i>PMC</i>
<i>Percent_Delta_Uf</i>	Valor <i>pu</i> limite de variação de <i>UfBit</i>
<i>Percent_Um</i>	Diferença relativa entre <i>Um</i> e <i>UmP</i>
<i>Percent_TI</i>	Valor <i>pu</i> limite de desvio de magnetização
<i>PMC</i>	Potência mecânica calculada
<i>PMP</i>	Potência mecânica prevista
<i>Re</i>	Resistência do circuito do rotor
<i>SCRs</i>	Retificadores controlados de silício de fase controlada
<i>SIN</i>	Sistema Interligado Nacional
<i>S_{pu}</i>	Potência aparente em <i>pu</i>
<i>Temp_Rotor</i>	Temperatura média no rotor
<i>TetaLim</i>	Limite de temperatura no rotor
<i>TetaLim1</i>	Limite de temperatura na ponte 1
<i>TetaLim2</i>	Limite de temperatura na ponte 2
<i>TetaTTE</i>	Limite de temperatura no transformador de excitação
<i>TNE1Bit</i>	Temperatura atual na região 1 do núcleo do estator
<i>TNE2Bit</i>	Temperatura atual na região 2 do núcleo do estator
<i>TNE3Bit</i>	Temperatura atual na região 3 do núcleo do estator
<i>TNE4Bit</i>	Temperatura atual na região 4 do núcleo do estator
<i>TPRtd1Bit</i>	Temperatura atual na ponte 1

<i>TPRtd2Bit</i>	Temperatura atual na ponte 2
<i>TTEBit</i>	Temperatura atual no transformador de excitação
<i>U2TeBit</i>	Tensão no secundário do transformador de excitação
<i>UabBit</i>	Tensão entre as fases ab
<i>UbcBit</i>	Tensão entre as fases bc
<i>UcaBit</i>	Tensão entre as fases ca
<i>UfBit</i>	Tensão atual aplicada no campo
<i>Ufc</i>	Tensão de campo calculada
<i>UGs</i>	Unidades de Geração
<i>UHE</i>	Usinas hidrelétricas
<i>Um</i>	Tensão média nos terminais do gerador
<i>UmP</i>	Tensão induzida prevista

Lista de símbolos

<i>α</i>	Nível de significância
<i>β</i>	Coefficientes estimados
<i>CA</i>	Corrente alternada
<i>CC</i>	Corrente contínua
<i>E_f</i>	Tensão de excitação
<i>f</i>	Frequência elétrica, em Hz
<i>FMM</i>	Força-magneto-motriz
<i>I_f</i>	Corrente de campo
<i>k</i>	Número de variáveis independentes
<i>KV</i>	Quilovolts
<i>KW</i>	Quilowatts
<i>mA</i>	Mili-amperes
<i>MME</i>	Ministério de Minas e Energia
<i>MW</i>	Mega-watts
<i>MVA</i>	Mega-volt-amperes
<i>p</i>	Número de pólos
<i>n</i>	Velocidade do rotor, em rpm
<i>η</i>	Rendimento
<i>T1</i>	Teste de monitoramento 1
<i>T2</i>	Teste de monitoramento 2
<i>T3</i>	Teste de monitoramento 3
<i>x</i>	Parâmetro do método superfície de resposta
<i>Y</i>	Resposta de interesse do método superfície de resposta

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Revisão Bibliográfica	1
1.3 Objetivos.....	5
1.4 Organização do Trabalho.....	6
2 MANUTENÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS.....	7
2.1 Introdução.....	7
2.2 Classificação das Técnicas de Manutenção	7
2.3 Tipos de Falhas de Geradores Síncronos	9
3 AS USINAS EM ESTUDO.....	11
3.1 Geração de Energia	11
3.1.1 Capacidade de Geração no Brasil.....	12
3.1.2 Processo de Geração de Energia.....	14
3.2 A Usina Foz do Chapecó	16
3.3 A Usina Campos Novos	17
3.4 Características do Gerador e Sistema de excitação	18
4 MONITORAMENTO DO GERADOR E SISTEMAS DE EXCITAÇÃO	20
4.1 Metodologia de Modelagem Virtual	20
4.2 Otimização dos Planos de Manutenção	21
4.3 Testes de Monitoramento das condições elétricas.....	23
4.3.1 Teste de Desequilíbrio de Tensão.....	23
4.3.2 Teste da Temperatura de Operação do Transformador de Excitação	27
4.3.3 Teste da Operação do Sistema de Excitação	28
4.3.4 Teste da Temperatura de Operação das pontes	33

4.3.5 Teste da Temperatura de Operação do Núcleo do Estator	35
4.3.6 Teste de Operação do Circuito de Magnetização	37
4.3.7 Teste de Operação da Temperatura do Rotor	41
4.3.8 Teste de Operação do Circuito Hidráulico	45
5 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS (DOE)	57
5.1 Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos	57
5.2 Estrutura do Planejamento e Análise de Experimentos	58
5.3 Aplicação da Metodologia DOE	59
5.3.1 Fatorial Completo	61
5.3.2 Superfície de Resposta (MSR)	61
5.4 DOE: Análises Gráficas e Resultados	62
5.4.1 DOE aplicado no Teste de Desequilíbrio de Tensão	62
5.4.2 DOE aplicado no Teste da Temperatura do Rotor	72
5.4.3 DOE aplicado no Teste de Operação do Circuito Hidráulico	76
5.4.4 DOE aplicado no Teste da Operação do Circuito de Magnetização	81
6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	84
REFERÊNCIAS.....	86

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O aprimoramento de indicadores de qualidade no setor elétrico surgiu em resposta às demandas de um mercado cada vez mais competitivo propiciando à busca de melhores práticas para elevação de índices de desempenho em usinas de geração de energia. Com a finalidade de obter e manter alta eficiência operacional, o presente trabalho apresenta um plano de desenvolvimento do sistema de diagnósticos preditivos para as condições elétricas de geradores síncronos e sistemas de excitação aplicados em duas usinas hidrelétricas (UHE), com capacidade acima de 800 MW no sul do Brasil.

Os geradores síncronos são elementos fundamentais nos sistemas elétricos de potência. A sua condição operacional é de grande importância, visto que afetam a confiabilidade do fornecimento de energia, bem como a estabilidade do sistema. Estas máquinas estão propensas a sofrer diversas falhas, de causas elétricas e/ou mecânicas. A proposta é a prévia detecção destas, e assim, informar de forma segura a estimativa de parada para manutenção. Deste modo, espera-se gerenciar melhor a operação dos geradores e o tempo de reparo das falhas.

Na concepção do Sistema Elétrico Brasileiro está associada a configuração de interligação entre as regiões, portanto, a confiabilidade da unidade de geração de cada usina é importante para a estabilidade global do sistema elétrico nacional. Dessa forma, o diagnóstico operacional das condições do sistema de excitação dos geradores síncronos possibilita atuações precisas nos ajustes dos parâmetros do conjunto, de forma a melhorar a estabilidade da conexão dos geradores ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

1.2 Revisão Bibliográfica

Os geradores síncronos são equipamentos centrais no processo de geração de energia elétrica. Portanto, estas máquinas requerem cuidados especiais para a melhoria na confiabilidade da geração, de modo a se evitar ao máximo paradas não programadas e prejuízos decorrentes. O monitoramento das condições elétricas pode ser definido pelo

processo de avaliação da saúde da máquina elétrica, a fim de se identificar um possível aparecimento de uma falha inicial.

O trabalho de Carvalho (2011) demonstra as principais bases para a definição de uma máquina síncrona, tendo em consideração as limitações no caráter materiais, como fabricação e montagem, de maneira a abranger toda a parte ativa da máquina. Neste também se apresentou uma visão materializada dos elementos de circuito representativos da máquina síncrona, a fim de que a conjugação dos efeitos propicie alternativas inovadoras. Os aquecimentos também são abordados, em uma perspectiva para o aproveitamento dos mesmos. Os resultados enfatizaram a forte ligação da geometria interna das partes ativas com as características de circuito da máquina, ao evidenciar que as grandezas elétricas são fisicamente dependentes da geometria e, assim, materializar os elementos de circuito.

O pesquisa desenvolvida por Coelho (2016) apresenta um modelo unificado para teste e simulação da proteção de geradores síncronos, ao contemplar a interação dos seus ajustes com os limites definidos no sistema de excitação das máquinas. Nesse contexto, implementou um sistema teste completo de geração em um Simulador Digital em Tempo Real (RTDS), o qual é um equipamento desenvolvido para estudos em tempo real de fenômenos transitórios eletromagnéticos relacionados aos sistemas de potência. Os resultados dessa avaliação são apresentados em diferentes cenários, para os quais a máquina pode ser submetida. Entretanto, o desempenho do sistema de excitação foi avaliado a partir de testes em tempo real, e, baseados nos requisitos técnicos mínimos definidos em normas nacionais e internacionais, permitiram verificar um comportamento satisfatório do modelo implementado.

O estudo de Salomon (2017) apresenta contribuições na aplicação da técnica de análise da assinatura elétrica (ESA – *Electrical Signature Analysis*) para a manutenção preditiva de geradores síncronos com rotor de pólos salientes e lisos. Esta consiste basicamente na análise dos sinais elétricos da máquina sob o monitoramento no domínio da frequência. Demonstrou-se que a análise de componentes simétricas associada ao padrão de frequência de rotação permite distinguir a origem de uma falha, elétrica ou mecânica. Também demonstrou a aplicação de usina em operação interligada no sistema elétrico de potência, com falhas de curto-circuito entre espiras do enrolamento do estator e desalinhamento mecânico. Através destas análises, identificou-se que para os geradores síncronos interligados no sistema, deve-se concentrar nos sinais de corrente,

diferentemente dos geradores síncronos isolados, nos quais o foco é na assinatura de tensão.

A pesquisa de Arrieta (2017) estuda o comportamento da densidade de fluxo magnético em máquinas síncronas de pequeno e grande porte. Com a finalidade de determinar como o curto circuito afeta a densidade de fluxo em várias regiões das máquinas síncronas, quando estas trabalham a vazio e com carga, demonstra os resultados da simulação da máquina de pequeno porte com os resultados de ensaios feitos no laboratório, em uma máquina de características iguais. As simulações foram realizadas no software de elementos finitos, no qual é um método de aproximação de problemas contínuos. A ideia principal é dividir um problema complexo e de grande área, em áreas pequenas e de melhor resolução. Após a validação dos dados resultantes, concluiu-se que este é um software robusto, e os resultados foram próximos dos dados reais, possibilitando-se conhecer a distribuição de fluxo magnético da máquina síncrona em diferentes condições de operação.

O trabalho de Torres (2018) apresenta uma metodologia de monitoramento e diagnóstico, que possibilita a identificação de falhas para um sistema de excitação *brushless*. Deste modo, trata-se da avaliação operacional do gerador em fase de sincronismo, e após, em operação integrada. O estudo foi aplicado nas usinas Termonordeste e Termoparaíba, localizadas na região nordeste do Brasil. Neste desenvolveu-se uma plataforma computacional, afim de acompanhar em tempo real possíveis anormalidades internas em alguns componentes dos geradores *brushless*. Assim mediante a emissão de alertas, informa-se a correta tomada de decisão quanto a parada imediata ou programada das unidades geradoras, a fim de garantir de vida útil deste tipo de geradores.

O trabalho de Maciel Junior (2011) foi desenvolvido em parceria com uma empresa do setor de autopeças, e apresenta o desenvolvimento de um processo de solda por resistência elétrica de pequena escala. O principal objetivo foi analisar os fatores de entrada (pressão de contato dos eletrodos, intensidade da corrente elétrica, tempo de soldagem e tempo de pré-pressão) que mais influenciavam o processo, e criar um modelo matemático que relacione estes com a variável de resposta (ruptura no teste destrutivo de tração de solda). Neste utilizou-se as técnicas do DOE, e assim, foi possível validar o processo de solda por resistência elétrica de pequena escala com um processo alternativo para a união de cabos multifilares e terminais metálicos de latão.

A pesquisa de Nunes Júnior (2012) apresentou uma análise de sensibilidade de variáveis de influência nos parâmetros dos distúrbios de afundamento de tensão, utilizando-se o DOE. Para tal, as análises foram feitas no sistema de transmissão de duas importantes concessionárias brasileiras: CEMIG e CEMAT. Neste contexto, os resultados obtidos comprovam a possibilidade assertiva da aplicação da metodologia para a área de qualidade de energia, uma vez que possibilitaram conclusões até então intuitivas, como exemplo, viu-se que as faltas trifásicas são as mais severas para os sistemas em estudo.

No estudo de Silva (2016) buscou-se identificar a combinação ótima dos parâmetros que oferecessem melhores resultados quanto à eficiência energética para equipamentos de refrigeração industrial, sendo estes responsáveis por uma grande quantidade de consumo de energia elétrica. Neste utilizou-se a metodologia de superfície de resposta para o DOE, e para a otimização robusta do processo o conceito de Projeto Parâmetros Robustos (PPR), Erro Quadrático Médio (EQM) e Método do Critério Global (MCG). Os resultados mostraram que os modelos matemáticos desenvolvidos se caracterizam como expressões de grande confiabilidade, confirmando a influência significativa que a carga térmica tem sobre o sistema.

O trabalho de Kashiwagi (2016) utilizou a técnica de multivariáveis para a otimização do processo de corte por plasma através da função desejabilidade (*desirability*). Este é um dos métodos do DOE, e permite avaliar um conjunto de dados simultaneamente, afim de determinar as condições mais desejáveis do estudo em análise. Os experimentos foram realizados no laboratório da engenharia mecânica da UNIFEI, e de uma maneira geral, percebeu-se que as respostas dos experimentos são influenciadas principalmente pelo fator velocidade de corte.

O trabalho de Sabioni (2018) foi desenvolvido com o objetivo de otimizar o processo industrial de filagem de queijo mussarela, com o intuito de aumentar o rendimento, em termos de recuperação de gordura do leite, e padronizar o teor de umidade dos produtos. Para tal, utilizou-se a metodologia de superfície de resposta para o planejamento de experimentos, assumindo-se duas variáveis de entrada: tempo de filagem e volume de água. Na modelagem das funções definiu-se pelas técnicas *desirability* e o método de Interseção Normal à Fronteira. O estudo constatou que, ainda que os processos de pequenas empresas sejam menos automatizados e mais instáveis aos fatores incontrolláveis, é possível estudar e propor melhorias por meio da aplicação de técnicas estatísticas mais robustas.

As literaturas listadas nos parágrafos anteriores evidenciam estudos para a redução de falhas em geradores e pelas melhorias das suas condições operacionais. Nesse contexto, o uso de ferramentas estatísticas como o Planejamento de Experimentos (DOE), das quais apresentam aplicações para diversas áreas de pesquisa, e também fornece condições para sua aplicação no desenvolvimento do modelo de máquina virtual e a busca pela eficiência operacional dos empreendimentos de geração. Desta forma, objetivar a redução da taxa de falhas dos sistemas de excitação, otimizar os planos de manutenção das unidades geradoras e aperfeiçoar o índice de disponibilidade das usinas, o foco deste trabalho.

1.3 Objetivos

O sistema desenvolvido busca pela melhoria da eficiência operacional dos empreendimentos de geração, possibilitando assim, uma redução da taxa de falhas dos sistemas de excitação, otimização dos planos de manutenção das unidades geradoras, e, por consequência, melhorar o índice de disponibilidade das usinas. Vale ressaltar que atualmente a busca por eficiência operacional dos empreendimentos é de suma importância mediante o cenário elétrico, energético e regulatório atual.

Assim, o modelo trará benefícios diretos para as usinas participantes do projeto, bem como para os outros agentes de geração do setor elétrico, proporcionando um aumento da confiabilidade operacional dos empreendimentos. A nova metodologia, após o processo de testes, deverá ser aplicada em qualquer unidade geradora com excitação estática, sem restrição de tamanho, capacidade nominal ou faixas de tensão. Evidentemente, será necessário realizar as parametrizações e adequações nos sistemas de comunicação e condicionamento de sinais.

Neste sentido, decidiu-se também pelo uso da metodologia Planejamento de Experimentos, ou DOE (*Design of Experiments*). Esta é uma técnica utilizada para se planejar experimentos, ou seja, para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletados, visando uma maior precisão estatística na resposta. Portanto, é uma ferramenta de extrema relevância, pois o seu emprego permite resultados confiáveis, e a sua aplicação é demonstrada para os testes de monitoramento das condições elétricas das usinas.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos.

O Capítulo 2 aborda as considerações e classificação das ações de manutenção, bem como os tipos de falhas evidenciadas em geradores síncronos.

No Capítulo 3 são apresentadas as características do processo de geração de energia, e também dos parâmetros construtivos referentes aos equipamentos das usinas.

O Capítulo 4 define a metodologia da modelagem virtual e otimização dos planos de manutenção, através dos exemplos dos testes das condições elétricas do gerador e sistema de excitação.

No Capítulo 5 demonstra-se a aplicação da técnica de Planejamento de Experimentos (DOE) para os testes de monitoramento da operação.

Por último, no Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões, bem como as recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2 MANUTENÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS

2.1 Introdução

Uma máquina síncrona, em estado permanente, roda a uma velocidade constante. Isto é, o campo do entreferro e o rotor da máquina síncrona rodam na mesma velocidade, que, por isso, esta é chamada de velocidade síncrona. As máquinas síncronas são usadas principalmente como geradores de energia elétrica. Os motores síncronos são o centro da maioria dos processos de produção industrial que exigem grandes potências. Portanto, essas máquinas merecem preocupação especial para aumentar a confiabilidade do processo produtivo. Neste sentido, muitas técnicas foram desenvolvidas para um monitoramento on-line do comportamento e desempenho da máquina síncrona.

Os parâmetros monitorados mais usuais são: tensão e corrente do estator; temperatura do núcleo; nível de vibração; potência instantânea; nível de contaminação no lubrificante e velocidade de rotação. Desta forma, pode-se notar que esta área da tecnologia exige conhecimento do funcionamento de máquinas elétricas, instrumentação, microprocessadores, processamento de sinais, análise de materiais, análise química e análise de vibrações.

O processo de monitoramento contínuo da condição das máquinas elétricas para o processo de produção pode trazer benefícios significativos para a empresa. Os principais são: maior eficiência do processo produtivo, redução das perdas por paradas não programadas, aumento da vida útil do equipamento e construção de um histórico de falhas. Sistemas de monitoramento contínuo devem observar parâmetros que forneçam à equipe de manutenção informações confiáveis para a tomada de decisão.

2.2 Classificação das Técnicas de Manutenção

Em geral, as filosofias de manutenção adotadas pela indústria de energia elétrica podem ser categorizadas como pertencentes a um ou outro dos seguintes: (KLEMPNER;KERSZENBAUM, 2004)

- *Manutenção Corretiva;*
- *Manutenção Preventiva;*
- *Manutenção Preditiva;*

Uma visão geral dessas diferentes abordagens de manutenção é discutida abaixo.

- *Manutenção Corretiva:* Trata-se da correção da falha de maneira aleatória, ou seja, a intervenção após a ocorrência do fato (falha ou desempenho menor do que o esperado). Este tipo de manutenção possui claras desvantagens. Pode-se citar, como exemplos, a ocorrência sistemática de paradas não-programadas, altos custos devidos a perdas de produção e redução da vida útil da máquina. Esse tipo de abordagem é geralmente empregado para ganhos econômicos de curto prazo, com pouca consideração para o futuro da peça específica do equipamento. Para um equipamento grande e central, como gerador, não é utilizada.
- *Manutenção Preventiva:* Trata-se do conjunto de ações desenvolvidas com o intuito de se evitarem falhas ou condições insatisfatórias, e conseqüentemente, se reduzir o número de ações corretivas, obedecendo a um planejamento baseado em intervalos definidos de tempo. Para a elaboração de um plano de manutenção preventiva, deve-se criar um conjunto de medições tecnicamente adequadas e selecionadas visando à confiabilidade e ao custo do programa. Outro fator importante está na determinação dos intervalos de tempo. Como, em geral, existe a tendência de se ser mais conservador, o programa normalmente considera intervalos menores que o necessário. Isso implica em parada e troca de peças desnecessárias, provocando mais custos e paradas na produção.
- *Manutenção Preditiva:* Na manutenção preditiva, o cronograma é baseado principalmente em cálculos estatísticos. Estes cálculos levam em conta parâmetros como tempo médio de falha de componentes críticos, idade dos componentes de isolamento, tipo de isolamento (sistemas de isolamento), ciclos de carga e eventos de operação anormais, como curto-circuito próximos da máquina devido à perda de potência da turbina e operação assíncrona curta devido à perda de excitação. Este tipo de manutenção é também chamado de Manutenção Baseada na Condição (*Condition*

Based Maintenance - CBM), por estar associada ao monitoramento contínuo da condição do equipamento. Quando se realiza uma intervenção, fruto do acompanhamento preditivo, está se fazendo uma manutenção corretiva planejada. A manutenção preditiva apresenta apoio em técnicas não invasivas, de forma que não é necessário parar a operação da máquina para sua aplicação, redução do número de ações corretivas não programadas, realização através de técnicas online ou off-line; determinação com antecedência quando será necessário realizar intervenções de manutenção em uma peça específica de um equipamento, aumento do tempo de disponibilidade dos equipamentos, prevenção de propagação dos danos, aproveitamento da vida útil total dos componentes de um equipamento, e determinação prévia de uma interrupção na produção e quais equipamentos precisam de manutenção.

Logo, existem fatores importantes na seleção de motores e geradores para finalidades específicas. No caso de um gerador, incluem: o tipo de máquina primária, o método de montagem a ser utilizado, o sentido de rotação, o fato de ser instalado em local aberto ou totalmente fechado, o tipo de controle a ser utilizado, as condições de manutenção em termos de acessibilidade, se o acoplamento à máquina primária é direto, e as condições genéricas do meio ambiente, de umidade, de tipo de atmosfera, e outras a que a máquina esteja submetida. (KOSTENKO;PIOTROVSKI;RODRIGUEZ, 1979)

Assim sendo, surgem benefícios consideráveis para a empresa geradora de energia, como a maior confiabilidade, a redução de paradas não programadas, o aumento da vida útil do gerador, e a criação de um histórico de falhas.

2.3 Tipos de Falhas de Geradores Síncronos

Em Duarte (2007) foi proposta uma divisão de falhas em Geradores Síncronos considerando-se três grupos:

1. Falhas de isolamento:

- Falhas entre fases nos enrolamentos estatóricos;
- Falhas a terra nos enrolamentos estatóricos;
- Falhas (curto-circuito) entre espiras nos enrolamentos estatóricos;

- Falta a terra no enrolamento rotórico, podendo causar curto-circuito entre polos e o aparecimento de vibração.

2. *Sobreaquecimento:*

- Sobreaquecimento nos mancais de guia e/ou escora, causado geralmente por problemas mecânicos e/ou de lubrificação;
- Sobreaquecimento nos enrolamentos do estator e/ou rotor, geralmente causado por sobrecarga, vibração, alta taxa de descargas parciais, desbalanço de fase, falha no sistema de refrigeração, curto-circuito entre espiras ou curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator.

3. *Outras condições anormais de operação:*

- Perda da excitação, total ou parcial, o que faz com que a máquina opere em regime de subexcitação, absorvendo potência reativa do sistema. Isso tende a originar sobreaquecimento no estator e no rotor, podendo também acarretar problemas de estabilidade ao sistema;
- Sobretensão ou subtensão nos terminais da máquina, que pode ser originada, por exemplo, por perda de carga ou operação em condição de sobre-excitação;
- Correntes desbalanceadas nos enrolamentos estatóricos, resultantes de cargas desbalanceadas, abertura de enrolamentos, componentes harmônicas ou outras fontes.
- Surgimento de correntes de sequência negativa tende a induzir correntes no rotor e no eixo com frequência dupla, originando sobreaquecimento localizado;
- Reversão de potência ou "motorização", problema significativo para a máquina primária, podendo ter reflexos no sistema;
- Perda de sincronismo;
- Sobre ou subfrequência, associada ou não a desbalanços de potência ativa e sobre ou subvelocidade mecânica;
- Problemas nos elementos mecânicos, como fogo, fissuras, quebra de elementos, perda da capacidade de lubrificação e afins;
- Problemas com os equipamentos auxiliares, como queima de fusíveis, perda de transformadores de acoplamento ou medição, perda do sistema de baixa tensão, defeito nos reguladores de tensão ou velocidade.

CAPÍTULO 3

3 AS USINAS EM ESTUDO

3.1 Geração de Energia

O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional (SIN) é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no SIN e pelo planejamento da operação dos sistemas isolados do país, sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Para o exercício de suas atribuições legais e o cumprimento de sua missão institucional, desenvolve uma série de estudos e ações exercidas sobre o sistema e seus agentes proprietários para gerenciar as diferentes fontes de energia e a rede de transmissão, de forma a garantir a segurança do suprimento contínuo em todo o país.

O ONS é composto por membros associados e membros participantes, que são as empresas de geração, transmissão, distribuição, consumidores livres, importadores e exportadores de energia. Também participam o Ministério de Minas e Energia (MME) e representantes dos Conselhos de Consumidores.

A capacidade instalada de geração do SIN é composta, principalmente, por usinas hidrelétricas distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país. Nos últimos anos, a instalação de usinas eólicas, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, apresentou um forte crescimento, aumentando a importância dessa geração para o atendimento do mercado. As usinas térmicas, em geral localizadas nas proximidades dos principais centros de carga, desempenham papel estratégico relevante, pois contribuem para a segurança do SIN.

Estas são despachadas em função das condições hidrológicas vigentes, permitindo a gestão dos estoques de água armazenada nos reservatórios das usinas hidrelétricas, para assegurar o atendimento futuro. Os sistemas de transmissão integram as diferentes fontes de produção de energia e possibilitam o suprimento do mercado consumidor.

O sistema hidrotérmico brasileiro possui características que o tornam único em âmbito mundial. Considerando a característica do SIN, constituído de múltiplas bacias com aproveitamentos hidrelétricos, com diferentes regimes hidrológicos, o sistema de transmissão não só foi desenvolvido para conectar geração e carga, mas também para permitir o máximo aproveitamento econômico da água nos reservatórios. (LIMA, 1996)

Desde meados da década de 70, o sistema eletro-energético brasileiro é operado de forma coordenada, visando obter ganhos sinérgicos a partir da interação entre os agentes. A operação coordenada visa minimizar os custos globais de produção de energia elétrica, aumentando a confiabilidade do atendimento.

Conceitualmente, a operação centralizada do Sistema Interligado Nacional está embasada na interdependência operativa entre as usinas, na interconexão dos sistemas elétricos e na integração dos recursos de geração e transmissão no atendimento ao mercado. A interdependência operativa é causada pelo aproveitamento conjunto dos recursos hidrelétricos, através da construção e da operação de usinas e reservatórios localizados em sequência em várias bacias hidrográficas.

Desta forma, a operação de uma determinada usina depende das vazões liberadas a montante por outras usinas que podem ser de outras empresas, ao mesmo tempo em que sua operação afeta as usinas a jusante, de forma análoga. A integração eletro-energética entre os sistemas de produção e transmissão para o suprimento do mercado consumidor permite o aproveitamento ótimo da água, gerando energia ou armazenando nos reservatórios do SIN.

3.1.1 Capacidade de Geração no Brasil

O Brasil possui no total 7.178 empreendimentos em operação, totalizando 162.058.015 KW de potência instalada. Para os próximos anos está prevista uma adição de 19.191.168 KW na capacidade de geração do país, proveniente dos 173 empreendimentos atualmente em construção e mais de 389 em empreendimentos com construção não iniciada. (ANEEL, 2018)

As informações apresentadas na Tabela 1 e na Figura 1, foram obtidas a partir do Banco de Informações de Geração - BIG, no site da Agência reguladora responsável pelos empreendimentos de energia elétrica no Brasil, a ANEEL. Os valores de porcentagem são referentes a Potência Fiscalizada.

A Potência Outorgada é igual a considerada no ato de outorga. No entanto, a Potência Fiscalizada é igual a considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora. Sua atualização é realizada periodicamente na página, essas informações foram extraídas em dezembro de 2018.

Tabela 1 - Empreendimentos em Operação

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
<i>CGH</i>	695	694.328	694.142	0,43
<i>CGU</i>	1	50	50	0
<i>EOL</i>	568	14.042.689	14.019.893	8,65
<i>PCH</i>	427	5.175.029	5.157.380	3,18
<i>UFV</i>	2.273	1.821.580	1.775.580	1,1
<i>UHE</i>	217	101.879.778	98.286.901	60,65
<i>UTE</i>	2.995	41.968.778	40.134.069	24,77
<i>UTN</i>	2	1.990.000	1.990.000	1,23
Total	7.178	167.572.232	162.058.015	100

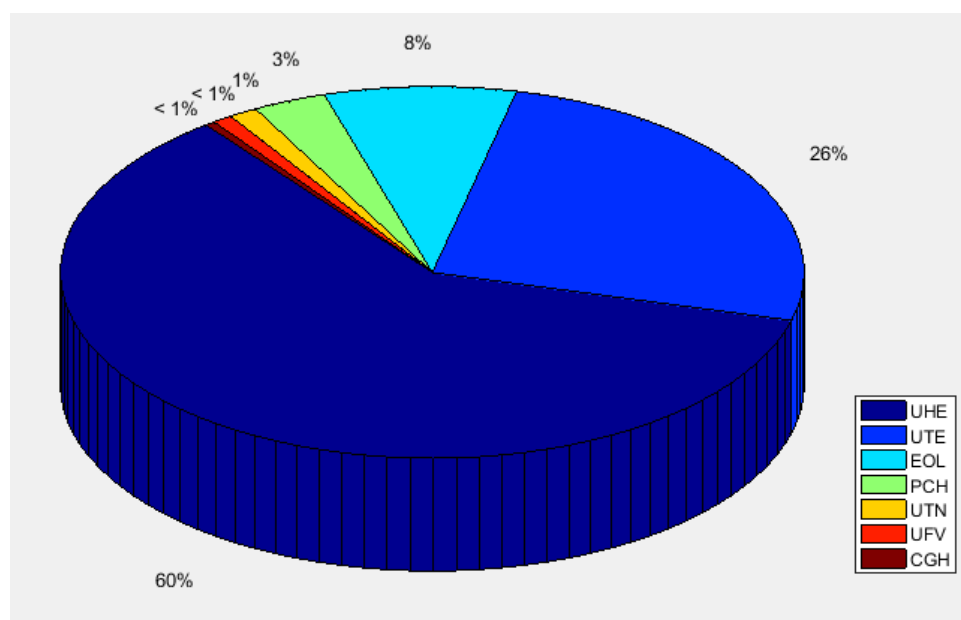


Figura 1 - Empreendimentos em Operação – Potência (%).

Fonte: Aneel (2018)

Tabela 2 - Legenda dos Empreendimentos em Operação

Sigla	Significado
<i>CGH</i>	Central Geradora Hidrelétrica
<i>CGU</i>	Central Geradora Undi-elétrica
<i>EOL</i>	Central Geradora Eólica
<i>PCH</i>	Pequena Central Hidrelétrica
<i>UFV</i>	Central Geradora Solar Fotovoltaica
<i>UHE</i>	Usina Hidrelétrica
<i>UTE</i>	Usina Termelétrica
<i>UTN</i>	Usina Termonuclear

3.1.2 Processo de Geração de Energia

Segundo Araújo et al. (2005), os componentes de uma usina hidrelétrica são:

- *Reservatório de água*: Local onde fica armazenada a água que é utilizada para fornecer energia mecânica ao gerador;
- *Barragem*: Responsável pela retenção da água para formação de um reservatório;
- *Comporta*: Responsável pelo controle de passagem da água pela tubulação forçada;
- *Turbina*: Equipamento cuja função é transformar energia potencial hidráulica em energia mecânica para o gerador, através do eixo;
- *Eixo*: Sua função é transmitir a energia mecânica da turbina para o gerador e para a excitatriz;
- *Mancais*: São elementos responsáveis pela sustentação do eixo do gerador;
- *Unidade geradora*: Transforma energia mecânica em energia elétrica;
- *Excitatriz*: Fornece corrente contínua para a criação do campo magnético no interior do gerador;
- *Subestação elevadora*: Transforma nível de tensão gerada (6KV, 13.8KV) para níveis de transmissão (138KV, 230KV)

A seguir descrevem-se as sequências para o processo de geração de energia. A Figura 2 ilustra este mecanismo.

1. A água do reservatório da usina é conduzida pela tomada da água até a casa de força, onde estão as turbinas;
2. A rotação das turbinas transforma a energia do movimento da água em energia mecânica;
3. A mesma rotação é transmitida para os geradores, que transformam a energia mecânica em energia elétrica;
4. A água que passou pelas turbinas é devolvida ao leito do rio através de uma estrutura chamada “canal de fuga”;
5. A energia produzida nos geradores é transmitida para a subestação da usina;
6. A mesma energia chega aos consumidores através das linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN);
7. Empresas, indústrias e milhares de casas são abastecidos com energia elétrica.

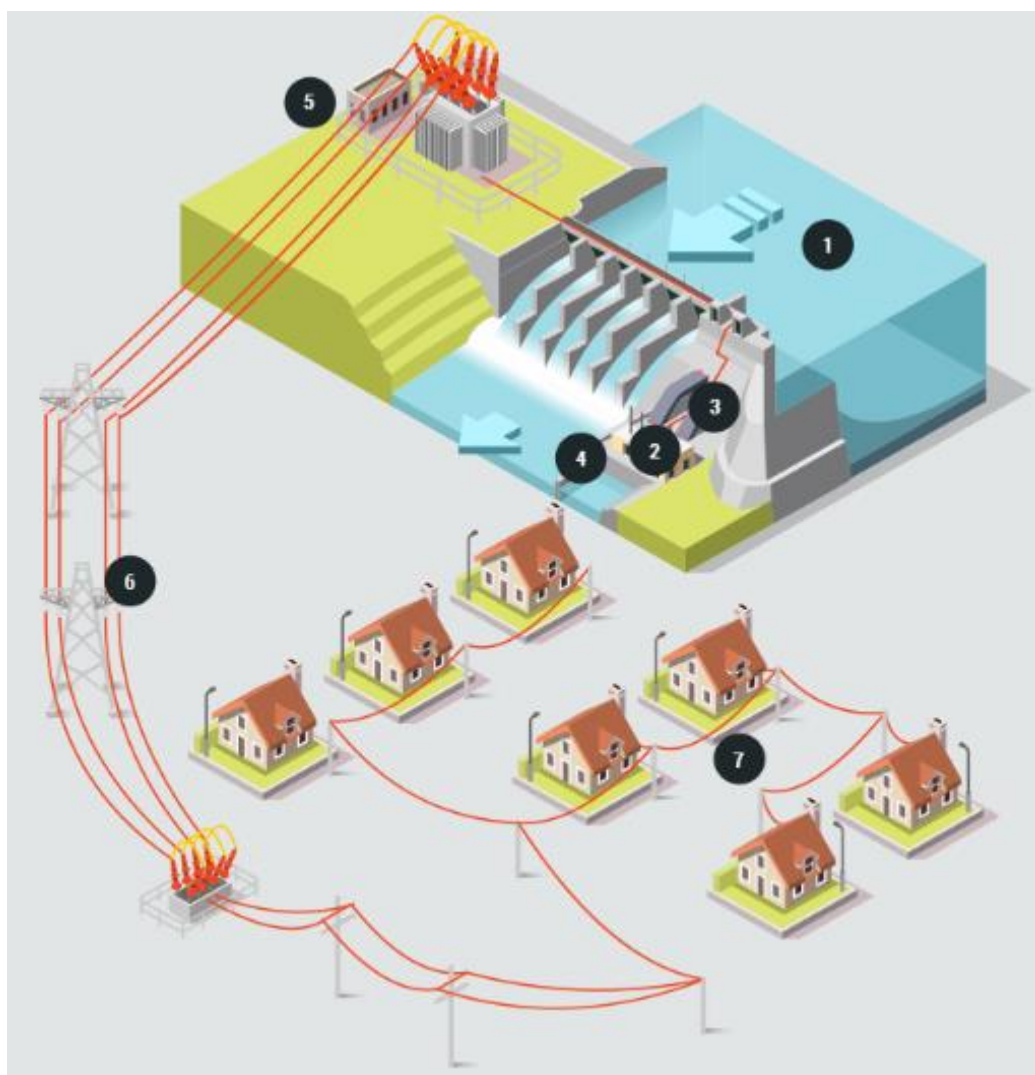


Figura 2 - Processo de geração de energia.

3.2 A Usina Foz do Chapecó

A Usina Hidrelétrica Foz de Chapecó está instalada no Rio Uruguai, entre os municípios de águas de Chapecó, em Santa Catarina, e Alpestre, no Rio Grande do Sul. A casa de força, onde as unidades geradoras estão abrigadas, fica totalmente localizada em Alpestre. A barragem da Usina Foz de Chapecó tem 598 metros de extensão e 48 metros de altura e foi a primeira do Brasil a utilizar a técnica do núcleo asfáltico, comum em países da Europa e nos Estados Unidos. Este propicia velocidade às obras mesmo em período chuvosos, já que é menos vulnerável à umidade. Também é reconhecido pelo excelente desempenho como impermeabilizante, garantindo total segurança no bloqueio da água.



Figura 3 - Usina Foz do Chapecó.

O vertedouro é formado por quinze comportas ($18,70 \times 20,60$ m) que escoam a água do reservatório não utilizada para a geração de energia. A capacidade máxima de descarga se aproxima da capacidade máxima de vazão da maior usina hidrelétrica em operação no país, a Usina de Itaipu (100 m³/s menor que Itaipu), sendo de 62.190 m³/s.

O reservatório da usina tem uma área de 79,2 Km², dos quais 40 Km² correspondem à própria calha do rio Uruguai. Sendo assim, apenas 39,2 Km² foram inundados para a formação do lago, tornando a Foz de Chapecó umas das usinas com menor coeficiente área alagada/potência instalada do Brasil.

A usina possui quatro unidades geradoras, com uma potência instalada de 855 MW, turbinas do tipo Francis, e uma energia assegurada de 432 MW. A sua capacidade equivale a 25% do consumo de energia do estado de Santa Catarina, ou 18% do consumo do Rio Grande do Sul. Esta energia é suficiente para abastecer mais de cinco milhões de lares.

3.3 A Usina Campos Novos

Em operação desde 2006, a Usina Hidrelétrica de Campos Novos responde a aproximadamente 25% do consumo de energia elétrica de todo o estado de Santa Catarina. A Usina Hidrelétrica de Campos Novos tem um reservatório com área inundada de 25,9 Km, sendo uma das maiores relações entre área e energia gerada do Brasil. Possui três unidades geradoras, com turbinas do tipo Francis Vertical, totalizando uma potência total instalada de 880 MW.



Figura 4 - Usina Campos Novos.

A barragem é a quarta mais alta do mundo do tipo enrocamento com face de concreto, com 202 m de altura, comprimento de crista de 592 m e elevação da crista na cota de 651 m. O canteiro de obras da usina está situado entre os municípios de Campos Novos (margem direita do rio Canoas) e Celso Ramos (margem esquerda), a 390 Km de Florianópolis, capital do estado de Santa Catarina.

O vertedouro é formado por quatro comportas, com comprimento de 94 m, do tipo superfície com controle de comportas. A capacidade máxima de vazão é de 18.300 m³/s. O reservatório da usina tem uma área de 34,6 Km², sendo 8,7 Km² calha do rio Campos.

3.4 Características do Gerador e Sistema de excitação

A partir do levantamento de campo da UHE Foz do Chapecó, bem como o acesso aos documentos disponibilizados, realizou-se uma análise dos dados técnicos relevantes que foram utilizados na modelagem virtual do sistema de excitação e gerador. As Tabelas 3, 4 e 5 apresentam os parâmetros de entrada do gerador síncrono.

Tabela 3 - Dados Técnicos

<i>Potência Aparente Nominal</i>	225	MVA
<i>Tensão Nominal (terminal)</i>	13,8	KV
<i>Corrente Nominal</i>	9413	A
<i>Fator de Potência</i>	0,95	
<i>Potência Ativa Nominal</i>	213,75	MW
<i>Rotação</i>	90	rpm

Tabela 4 - Reatâncias Equivalentes

<i>X_d</i>	0,945	pu
<i>X'_d</i>	0,259	pu
<i>X''_d</i>	0,204	pu
<i>T'_d</i>	1.34	pu
<i>X''_q</i>	0,216	pu

Tabela 5 - Circuito do Rotor

<i>Resistência a 20° C</i>	0,0709	ohm
<i>Resistência a 120° C</i>	0,1088	ohm
<i>Perdas no Cobre (Cu) Rotor a 75° C</i>	768,8	KW
<i>Perdas nas escovas (I Nominal)</i>	5,1	KW

Os valores da temperatura de operação apresentados na Tabela 6 são definidos pelo fabricante, atualizados pelo sistema e constantemente comparados com os valores esperados de operação, os quais dependem da condição operacional do gerador.

Tabela 6 - Temperaturas de Operação

<i>Máxima Estator</i>	120 °C
<i>Máxima Rotor</i>	120 °C
<i>Junção do Tiristor em sobrecarga</i>	86 °C
<i>Dissipadores dos tiristores em sobrecarga</i>	59 °C

As Tabelas 7 e 8 apresentam os parâmetros de entrada do sistema de excitação.

Tabela 7 - Sistema de Excitação

<i>Tensão em vazio</i>	166	V
<i>Corrente em vazio</i>	1621	A
<i>Tensão Nominal</i>	276	V
<i>Corrente Nominal</i>	2537	A
<i>Tensão Máxima</i>	292	V
<i>Corrente Máxima</i>	2691	A
<i>Tensão Ceiling</i>	442,5	V
<i>Corrente Ceiling</i>	4067	A

Tabela 8 - Transformador de Excitação

<i>Tensão primário fase-fase</i>	13800	V
<i>Tensão secundário fase-fase</i>	710	V
<i>Conexão primário</i>	Estrela	
<i>Conexão secundário</i>	Delta	
<i>Potência Nominal</i>	2,97	MVA
<i>Potência Sobrecarga</i>	4,08	MVA
<i>Corrente secundário</i>	2415,1	A

CAPÍTULO 4

4 MONITORAMENTO DO GERADOR E SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

4.1 Metodologia de Modelagem Virtual

O modelo foi construído com base na metodologia de desenvolvimento de realidade virtual. Este foi desenvolvido e parametrizado fundamentado em ensaios de comissionamento, informações técnicas do fabricante e dados operacionais coletadas ao longo do período em funcionamento.

A metodologia de análise preditiva consiste em etapas de aprendizagem progressiva do modelo virtual injetando-se os dados reais na entrada, avaliando-os na saída e ajustando os parâmetros pertinentes. Ao efetuar todas as etapas de aprendizagem por meio de uma varredura completa dos dados e dos parâmetros, o gerador virtual irá se antecipar às falhas ou anormalidades, garantindo assim uma maior assertividade nas atividades de manutenção do sistema real do gerador e excitação.

Portanto, este consiste em comparar continuamente os dados operacionais em tempo real dos sistemas com os resultados do modelo virtual. Os desvios entre as medidas reais e as obtidas do modelo são avaliadas, considerando-se as respectivas características do sistema. A modelagem de otimização do plano de manutenção consiste em definir as equações que representam o funcionamento ideal para:

- *Regulador de tensão;*
- *Circuito de disparo;*
- *Ponte de tiristores;*
- *Pólos do gerador (espiras e conexões);*
- *Núcleo do estator e enrolamentos;*
- *Abertura do distribuidor e queda bruta.*

4.2 Otimização dos Planos de Manutenção

Os modelos computacionais foram desenvolvidos em linguagem *Ladder* e implementados em um Controlador Lógico Programável (CLP). No mesmo algoritmo, incluíram-se as variáveis de entrada, parâmetros, equações e a lógica de programação. A saída do sistema possui uma Interface Homem Máquina (IHM), que permite o acompanhamento da operação do gerador continuamente e demonstra-se a leitura dos valores encontrados para cada teste de monitoramento. Todas as variáveis foram separadas em quatro tipos, de acordo com sua utilização, definidas por:

- *Rede*: Variáveis do CLP que recebem dados via Rede *Modbus*;
- *IHM*: Variáveis do CLP que recebem dados via IHM;
- *Interna*: Variáveis internas ou auxiliares utilizadas em cálculos internos;
- *Saída*: Variáveis do CLP que enviam dados para a IHM e/ou Rede *Modbus*.

A Figura 5 demonstra o fluxograma genérico dos testes realizados.

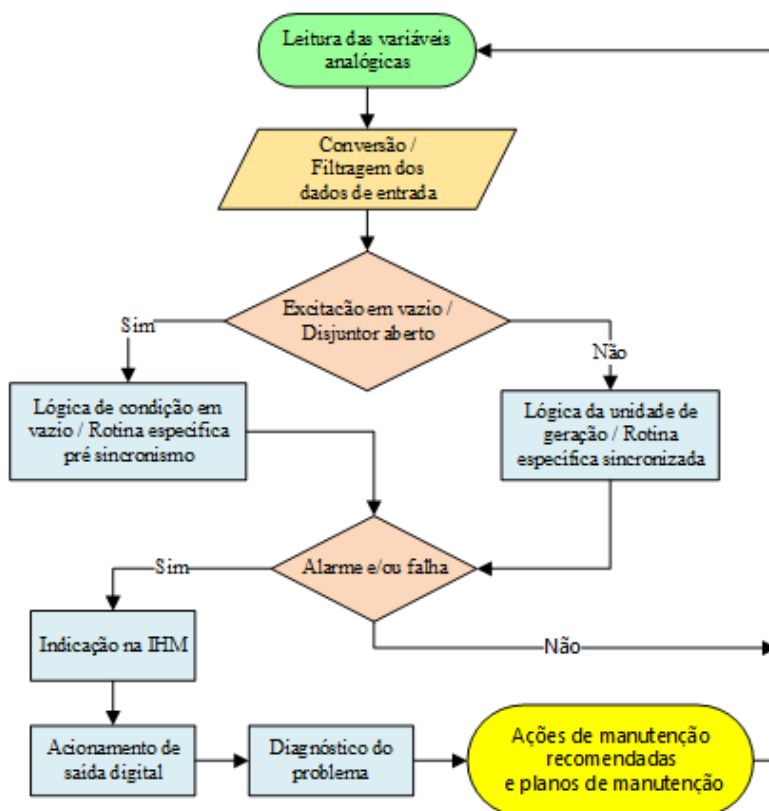


Figura 5 - Fluxograma genérico dos testes realizados.

Um diferencial no sistema é a indicação das ações de manutenção necessárias a serem tomadas, a partir dos diagnósticos operacionais, com base na comparação entre os valores reais e os esperados do modelo virtual. A equipe de operação e manutenção das usinas hidrelétricas deve definir o desvio que caracteriza uma falha, com base nas características da planta e nos registros operacionais.

Assim, uma vez que o sistema desenvolvido possui uma parametrização flexível, ele pode ser personalizado para diferentes aplicações. Após a alerta de falhas/desvios, o sistema possui uma matriz que identifica o problema e a ação de manutenção recomendada, de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 - Problema identificado e ação de manutenção recomendada

Sistema defeituoso	Origem da falha	Ação recomendada
<i>Sistema de Excitação</i>	Circuito de disparo	Verificar o painel de disparo
		Medir o sistema de amplificação de pulso
		Verificar as tensões de referência de disparo
	Regulador de Tensão	Verificar a fonte de energia
		Verificar o cartão de saída
Circuito de magnetização	Verificar o circuito do transdutor	
<i>Gerador</i>	Ponte de tiristores	Verificar as condições de condução dos tiristores
		Verificar o sinal da placa de disparo para a ponte
	Enrolamento do Estator	Verificar o circuito do transdutor
		Inspecionar visualmente o enrolamento
		Inspecionar as conexões
	Rotor do Gerador	Verificar o circuito do transdutor
		Inspecionar conexões
	Núcleo do Estator	Medir a resistência do circuito dos pólos
		Comparar as medidas dos sensores
		Verificar as condições de operação dos sensores
Sistema de Refrigeração		Inspecionar visualmente a parte de trás do núcleo
		Verificar os medidores
		Inspecionar os permutadores de calor
		Verificar a velocidade do ar
		Verificar a temperatura do permutador de calor

4.3 Testes de Monitoramento das condições elétricas

Neste capítulo demonstram-se os resultados dos testes de monitoramento das condições de operação dos circuitos do Gerador e Sistemas de Excitação. Os valores apresentados são resultantes de medições realizadas nas usinas Foz do Chapecó e Campos Novos.

4.3.1 Teste de Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio em um sistema elétrico trifásico é uma condição na qual as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo ou defasagem angular entre fases diferentes de 120 graus elétricos ou, ainda, as duas condições simultaneamente.

O desequilíbrio de tensão também é muitas vezes definido como o desvio máximo dos valores médios das tensões dos mesmos valores, expresso em porcentagem. (PAULILLO, G. 2001)

Segundo a Aneel (2018), para a metodologia de medição, os sinais devem utilizar sistemas cujas informações coletadas possam ser processadas por meio de recurso computacional para medição das tensões trifásicas. De forma a eliminar possíveis efeitos das componentes de sequência zero, as medições devem ser realizadas para as tensões fase-fase.

Para a sua análise e dos demais modelos, foram definidos três testes de monitoramento, representadas por T1, T2 e T3. A Tabela 10 apresenta as variáveis de entrada, sendo estas coletadas e medidas em cada instante, e assim, apresenta-se variação nas mesmas.

Tabela 10 - Teste de desequilíbrio de tensão

Variáveis de entrada	T1	T2	T3
<i>UabBit</i>	13800	13800	13800
<i>UbcBit</i>	12240	13248	13850
<i>UcaBit</i>	13110	13500	13600

A seguir apresenta-se o fluxograma deste monitoramento.

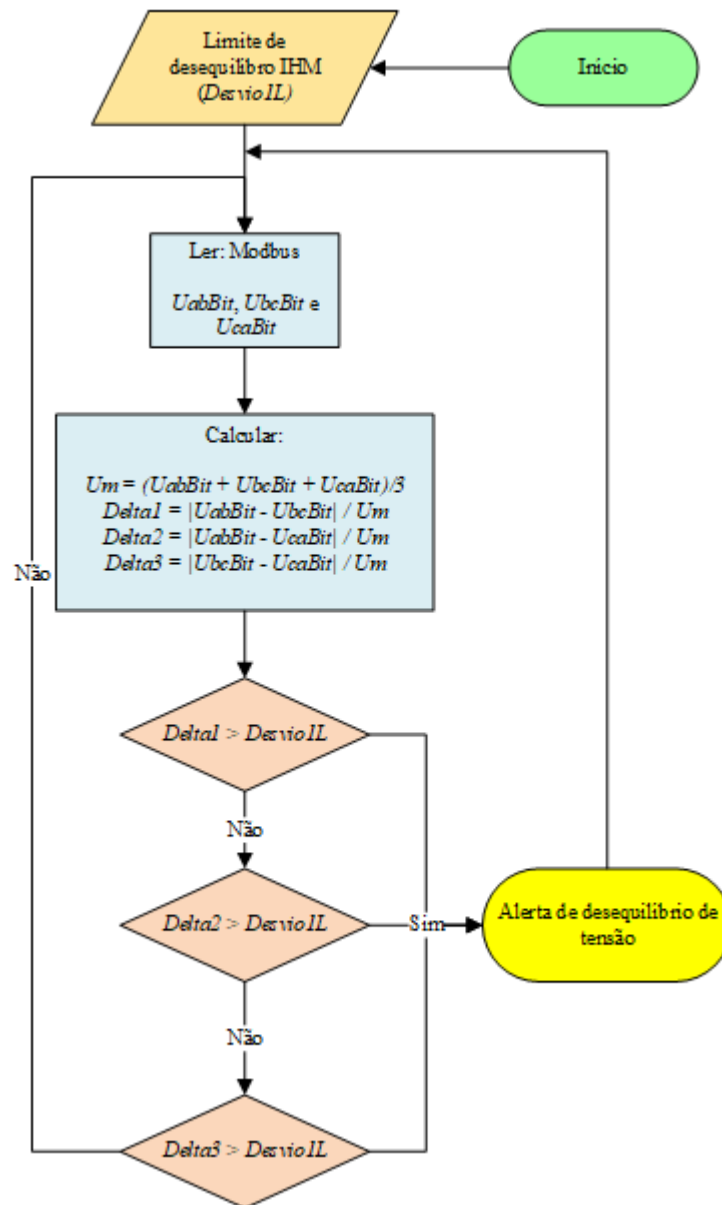


Figura 6 - Fluxograma do teste de desequilíbrio de tensão.

Portanto, têm-se:

- *Delta1*: Diferença entre as tensões *Uab* e *Ubc*, dividida por *Um*;
- *Delta2*: Diferença entre as tensões *Uab* e *Uca*, dividida por *Um*;
- *Delta3*: Diferença entre as tensões *Ubc* e *Uca*, dividida por *Um*;

As equações que definem o teste são respectivamente:

$$U_m = \frac{(U_{abBit} + U_{bcBit} + U_{caBit})}{3} \quad (4.3.1.1)$$

$$\Delta_1 = \frac{|U_{abBit} - U_{bcBit}|}{U_m} \quad (4.3.1.2)$$

$$\Delta_2 = \frac{|U_{abBit} - U_{caBit}|}{U_m} \quad (4.3.1.3)$$

$$\Delta_3 = \frac{|U_{bcBit} - U_{caBit}|}{U_m} \quad (4.3.1.4)$$

A seguir, demonstram-se os cálculos.

– Teste 1:

$$U_{m1} = \frac{(U_{ab} + U_{bc} + U_{ca})}{3} = \frac{(13800 + 12240 + 13110)}{3} = 13050 \text{ V}$$

$$\Delta_1 = \frac{|U_{ab} - U_{bc}|}{U_{m1}} = \frac{|13800 - 12240|}{13050} = 0,1195$$

$$\Delta_2 = \frac{|U_{ab} - U_{ca}|}{U_{m1}} = \frac{|13800 - 13110|}{13050} = 0,05287$$

$$\Delta_3 = \frac{|U_{bc} - U_{ca}|}{U_{m1}} = \frac{|12240 - 13110|}{13050} = 0,06667$$

– Teste 2:

$$U_{m2} = \frac{(U_{ab} + U_{bc} + U_{ca})}{3} = \frac{(13800 + 13248 + 13500)}{3} = 13516 \text{ V}$$

$$\Delta_1 = \frac{|U_{ab} - U_{bc}|}{U_{m1}} = \frac{|13800 - 13248|}{13516} = 0,0408$$

$$\Delta_2 = \frac{|U_{ab} - U_{ca}|}{U_{m1}} = \frac{|13800 - 13110|}{13516} = 0,0222$$

$$\Delta_3 = \frac{|U_{bc} - U_{ca}|}{U_{m1}} = \frac{|12240 - 13110|}{13516} = 0,0186$$

– Teste 3:

$$Um3 = \frac{(Uab + Ubc + Uca)}{3} = \frac{(13800 + 13850 + 13600)}{3} = 13750 \text{ V}$$

$$Delta1 = \frac{|Uab - Ubc|}{Um1} = \frac{|13800 - 13850|}{13750} = 0,00364$$

$$Delta2 = \frac{|Uab - Uca|}{Um1} = \frac{|13800 - 13600|}{13750} = 0,0145$$

$$Delta3 = \frac{|Ubc - Uca|}{Um1} = \frac{|13850 - 13600|}{13750} = 0,0182$$

Deste modo, com um parâmetro imputado (*Desvio_1L*), calculam-se os respectivos percentuais, a fim de detectar a alerta de desequilíbrio de tensão.

Para cada teste, faz-se:

– Teste 1:

$$Delta1 > Desvio_{1L} = 0,1195 > 0,05 = \textit{Alerta de desequilíbrio de tensão}$$

$$Delta2 > Desvio_{1L} = 0,05287 > 0,05 = \textit{Alerta de desequilíbrio de tensão}$$

$$Delta3 > Desvio_{1L} = 0,06667 > 0,05 = \textit{Alerta de desequilíbrio de tensão}$$

– Teste 2:

$$Delta1 > Desvio_{1L} = 0,0408 < 0,05 = \textit{Operando normalmente}$$

$$Delta2 > Desvio_{1L} = 0,0222 < 0,05 = \textit{Operando normalmente}$$

$$Delta3 > Desvio_{1L} = 0,0186 < 0,05 = \textit{Operando normalmente}$$

– Teste 3:

$$Delta1 > Desvio_{1L} = 0,00364 < 0,05 = \textit{Operando normalmente}$$

$$Delta2 > Desvio_{1L} = 0,0145 < 0,05 = \textit{Operando normalmente}$$

$$\Delta 3 > \text{Desvio}_{1L} = 0,0182 < 0,05 = \text{Operando normalmente}$$

Assim, obteve-se a alerta de desequilíbrio de tensão entre as fases para o teste 1.

4.3.2 Teste da Temperatura de Operação do Transformador de Excitação

Para este teste também se define um parâmetro imputado, e calculam-se a relação entre as temperaturas, a fim de detectar a alerta ou não de problema de sobretemperatura no transformador de excitação.

Tabela 11 - Teste da operação do transformador de excitação

Variável medida	T1	T2	T3
<i>TTEBit</i>	78	85	100
Parâmetro imputado			
<i>TetaTTE</i>	90	90	90

A seguir apresenta-se o fluxograma deste monitoramento.

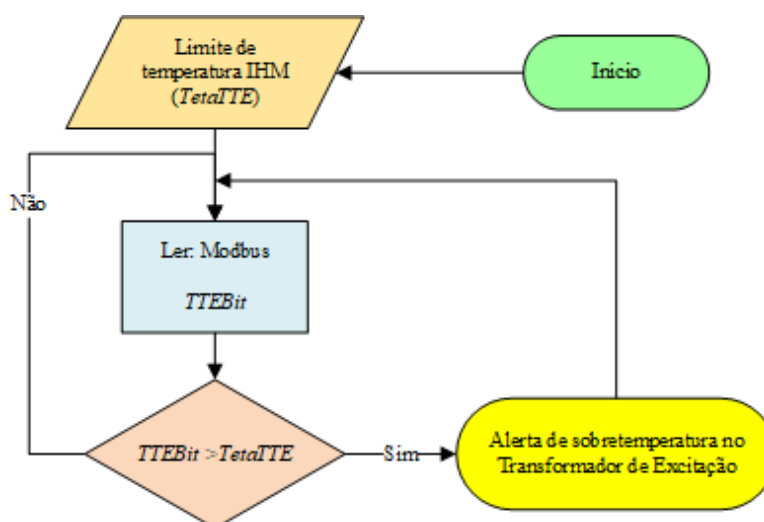


Figura 7 - Fluxograma do teste de monitoramento da temperatura de operação do transformador de excitação.

Assim, têm-se:

$$TTE > Teta TTE = Alerta de problema de sobretemperatura$$

Portanto, fazem-se os seguintes cálculos:

– Teste 1:

$$TTE < Teta TTE = 78 < 90 = Operando normalmente$$

– Teste 2:

$$TTE > Teta TTE = 85 < 90 = Operando normalmente$$

– Teste 3:

$$TTE > Teta TTE = 100 > 90 = Alerta de problema de sobretemperatura$$

Sendo assim, têm-se a alerta de problema de sobretemperatura no transformador de excitação para o teste 3.

4.3.3 Teste da Operação do Sistema de Excitação

A Tabela 12 apresenta as variáveis medidas e os parâmetros imputados.

Tabela 12 - Teste da operação do sistema de excitação

Variáveis medidas	T1	T2	T3
<i>UabBit</i>	13800	13800	13800
<i>UbcBit</i>	13248	13248	13248
<i>UcaBit</i>	13500	13500	13500
<i>IAlfaBit</i>	11,75	12,60	11,75
<i>U2TeBit</i>	695,6097	695,6097	660,9755
<i>UfBit</i>	211	211	211
Parâmetros imputados			
<i>Parametro_a</i>	-8,125	-8,125	-8,125
<i>Parametro_b</i>	172,5	172,5	172,5
<i>Kten</i>	19,44	19,44	19,44

ΔK_{ten}	0,02	0,02	0,02
ΔU_f	0,1	0,1	0,1

O fluxograma deste monitoramento é representado na Figura 8.

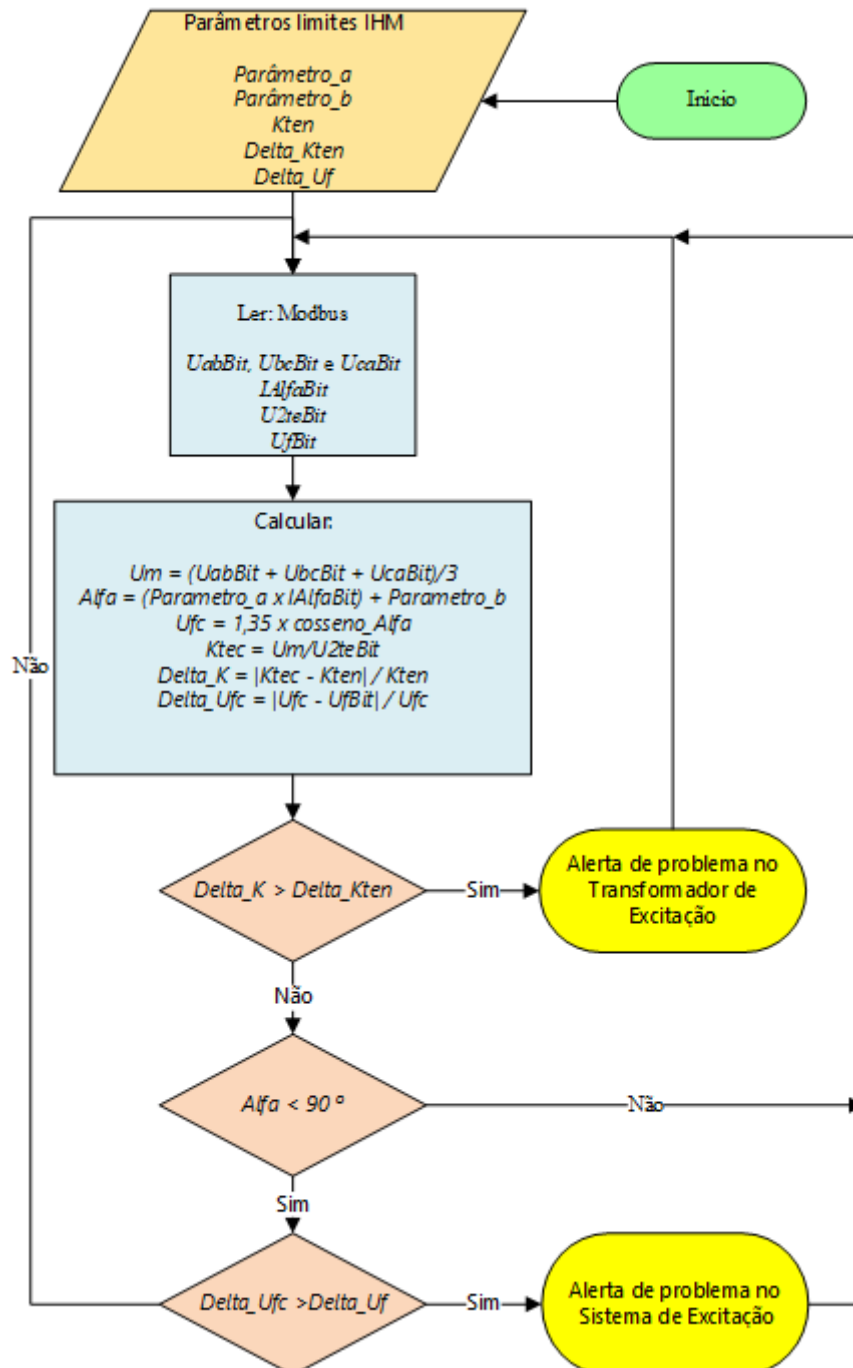


Figura 8 - Fluxograma do teste de monitoramento de operação do sistema de excitação.

As equações que estabelecem o teste são:

$$U_m = \frac{(U_{abBit} + U_{bcBit} + U_{caBit})}{3} \quad (4.3.3.1)$$

$$Alfa = (Parametro_a \times IAlfaBit) + Parametro_b \quad (4.3.3.2)$$

$$U_{fc} = 1,35 \times \cos Alfa \quad (4.3.3.3)$$

$$K_{tec} = \frac{U_m}{U_{2teBit}} \quad (4.3.3.4)$$

$$Delta_K = \frac{|K_{tec} - K_{ten}|}{K_{ten}} \quad (4.3.3.5)$$

$$Delta_{U_{fc}} = \frac{|U_{fc} - U_{fBit}|}{U_{fc}} \quad (4.3.3.6)$$

Na sequência, demonstram-se os cálculos estipulados pelo fluxograma da Figura 8 para cada parâmetro imputado, com a finalidade de verificar a possível alerta de problema no transformador de excitação e/ou no sistema de excitação.

I. Parâmetro U_m

- Testes 1, 2 e 3:

$$U_{m1} = \frac{(U_{ab} + U_{bc} + U_{cs})}{3} = \frac{(13800 + 13248 + 13500)}{3} = 13516 \text{ V}$$

II. Parâmetro $Alfa$

- Testes 1 e 3:

$$\begin{aligned} \text{Alfa}(T1, T3) &= (\text{Parametro}_a \times I\text{Alfa}) + \text{Parametro}_b \\ \text{Alfa}(T1, T3) &= ((-8,125) \times (11,75)) + 172,5 = 77,0313^\circ \end{aligned}$$

– Teste 2:

$$\begin{aligned} \text{Alfa}(T2) &= (\text{Parametro}_a \times I\text{Alfa}) + \text{Parametro}_b \\ \text{Alfa}(T2) &= ((-8,125) \times (12,60)) + 172,5 = 70,125^\circ \end{aligned}$$

III. Parâmetro U_{fc}

Para o cálculo do parâmetro U_{fc} , primeiramente se faz necessário realizar a seguinte relação de transformação:

– Testes 1, 2 e 3:

$$\frac{13800}{13516} = \frac{710}{U_{m2}} \quad (4.3.3.7)$$

$$U_{m2} = \frac{710 \times 13516}{13800} = 695,388 \text{ V}$$

– Testes 1 e 3:

$$\begin{aligned} U_{fc} &= 1,35 \times U_{m2} \times \text{cosseno}(\text{Alfa}) = 1,35 \times (695,388) \times \text{cosseno}(77,0313^\circ) \\ &= 210,678 \text{ V} \end{aligned}$$

– Teste 2:

$$\begin{aligned} U_{fc} &= 1,35 \times U_{m2} \times \text{cosseno}(\text{Alfa}) = 1,35 \times (695,388) \times \text{cosseno}(70,125^\circ) \\ &= 319,154 \text{ V} \end{aligned}$$

IV. Parâmetro K_{tec}

– Testes 1 e 2:

$$K_{tec} = \frac{U_m}{U_{2te}} = \frac{13516}{695,6097} = 19,43$$

- Teste 3:

$$K_{tec} = \frac{U_m}{U_{2te}} = \frac{13516}{660,9755} = 20,448$$

V. Parâmetro ΔK

- Testes 1 e 2:

$$\Delta K = \frac{|K_{tec} - K_{ten}|}{K_{ten}} = \frac{|19,43 - (19,44)|}{19,44} = 0,000514$$

- Teste 3:

$$\Delta K = \frac{|K_{tec} - K_{ten}|}{K_{ten}} = \frac{|20,448 - 19,44|}{19,44} = 0,0518$$

VI. Parâmetro ΔU_{fc}

- Testes 1 e 3:

$$\Delta U_{fc} = \frac{|U_{fc} - U_f|}{U_f} = \frac{|210,678 - 211|}{210,678} = 0,00153$$

- Teste 2:

$$\Delta U_{fc} = \frac{|U_{fc} - U_f|}{U_f} = \frac{|319,154 - 211|}{319,154} = 0,3389$$

No entanto, têm-se:

$\Delta K < \Delta K_{ten}$ = Alerta de problema no transformador de excitação

$\Delta U_{fc} > \Delta U_f$ = Alerta de problema no sistema de excitação

Portanto, para cada transformador, fazem-se os seguintes cálculos:

– Teste 1:

$$\Delta K < \Delta K_{ten} = 0,000514 < 0,02 = \text{Operando normalmente}$$

$$\Delta U_{fc} > \Delta U_f = 0,00153 < 0,1 = \text{Operando normalmente}$$

– Teste 2:

$$\Delta K < \Delta K_{ten} = 0,000514 < 0,02 = \text{Operando normalmente}$$

$$\Delta U_{fc} > \Delta U_f = 0,3389 > 0,1 = \text{Alerta no sistema de excitação}$$

– Teste 3:

$$\Delta K < \Delta K_{ten} = 0,0518 > 0,02 = \text{Alerta no transformador de excitação}$$

$$\Delta U_{fc} > \Delta U_f = 0,00153 < 0,1 = \text{Operando normalmente}$$

Sendo assim, têm-se a alerta de problema no transformador de excitação para o teste 3, e de problema no sistema de excitação para o teste 2.

4.3.4 Teste da Temperatura de Operação das pontes

Nesse teste, definem-se dois parâmetros, e calculam-se a relação entre as temperaturas, no intuito de detectar a alerta de sobretemperatura nas pontes retificadoras.

Tabela 13 - Teste da temperatura de operação das pontes

Variáveis medidas	T1	T2	T3
<i>TPRtd1Bit</i>	60	100	60
<i>TPRtd2Bit</i>	60	60	100
Parâmetro imputado			
<i>TetaLim1</i>	90	90	90
<i>TetaLim2</i>	90	90	90

A seguir demonstra-se o fluxograma referente a este monitoramento.

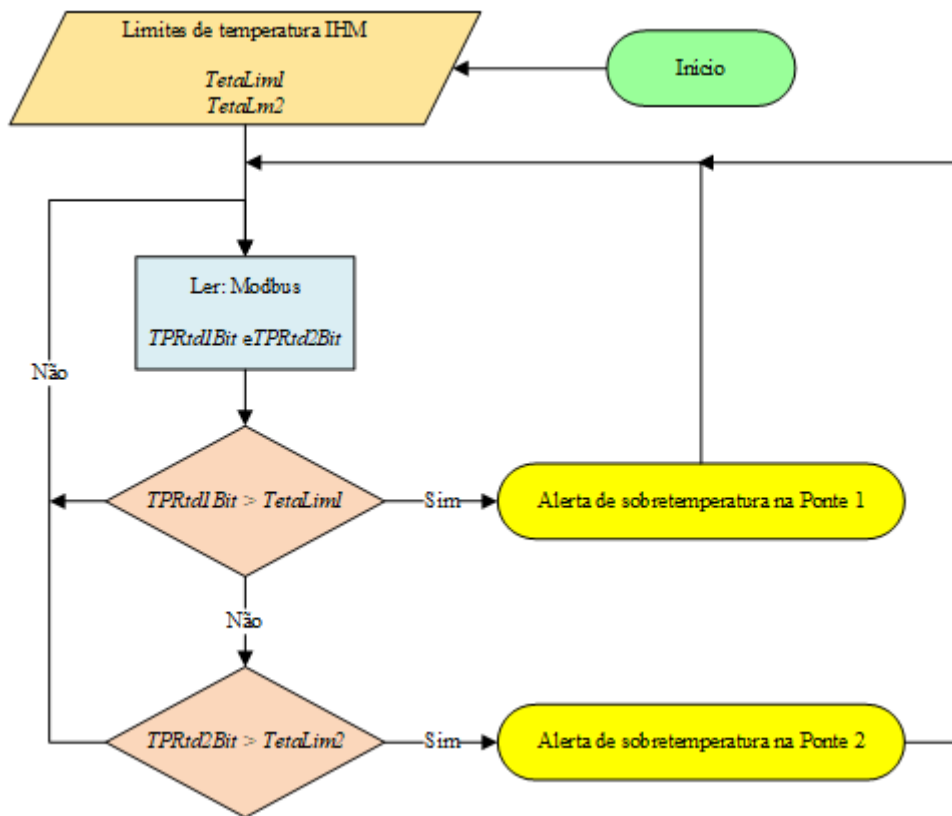


Figura 9 - Fluxograma do teste de monitoramento da temperatura de operação das pontes.

Assim, têm-se as seguintes condições:

$TPRTd1 > TetaLim1 =$ Alerta de problema de sobretemperatura na ponte 1

$TPRTd2 > TetaLim2 =$ Alerta de problema de sobretemperatura na ponte 2

Portanto, fazem-se os seguintes cálculos:

– Teste 1:

$TPRTd1 < TetaLim1 = 60^\circ < 90^\circ =$ Operando normalmente

$TPRTd2 > TetaLim2 = 60^\circ < 90^\circ =$ Operando normalmente

– Teste 2:

$TPRTd1 > TetaLim1 = 100^\circ > 90^\circ =$ Alerta de problema de sobretemperatura

$$TPRTd2 < TetaLim2 = 60^\circ < 90^\circ = \text{Operando normalmente}$$

– Teste 3:

$$TPRTd1 = TetaLim1 = 60^\circ < 90^\circ = \text{Operando normalmente}$$

$$TPRTd2 < TetaLim2 = 100^\circ > 90^\circ = \text{Alerta de problema de sobretemperatura}$$

Sendo assim, têm-se a alerta de problema de sobretemperatura na ponte retificadora 1 para o teste 2, e na ponte retificadora 2 para o teste 3.

4.3.5 Teste da Temperatura de Operação do Núcleo do Estator

A Tabela 14 apresenta as variáveis medidas e um parâmetro imputado. Assim, calculam-se a relação entre as temperaturas, no intuito de detectar a alerta de sobretemperatura no núcleo do estator.

Tabela 14 - Teste da temperatura de operação do núcleo do estator

Variáveis medidas	T1	T2	T3
<i>TNE1Bit</i>	120	135	115
<i>TNE2Bit</i>	115	115	120
<i>TNE3Bit</i>	120	120	135
<i>TNE4Bit</i>	115	115	115
Parâmetro imputado			
<i>TetaLimNE</i>	130	130	130

O fluxograma relativo a este monitoramento é apresentado na Figura 10.

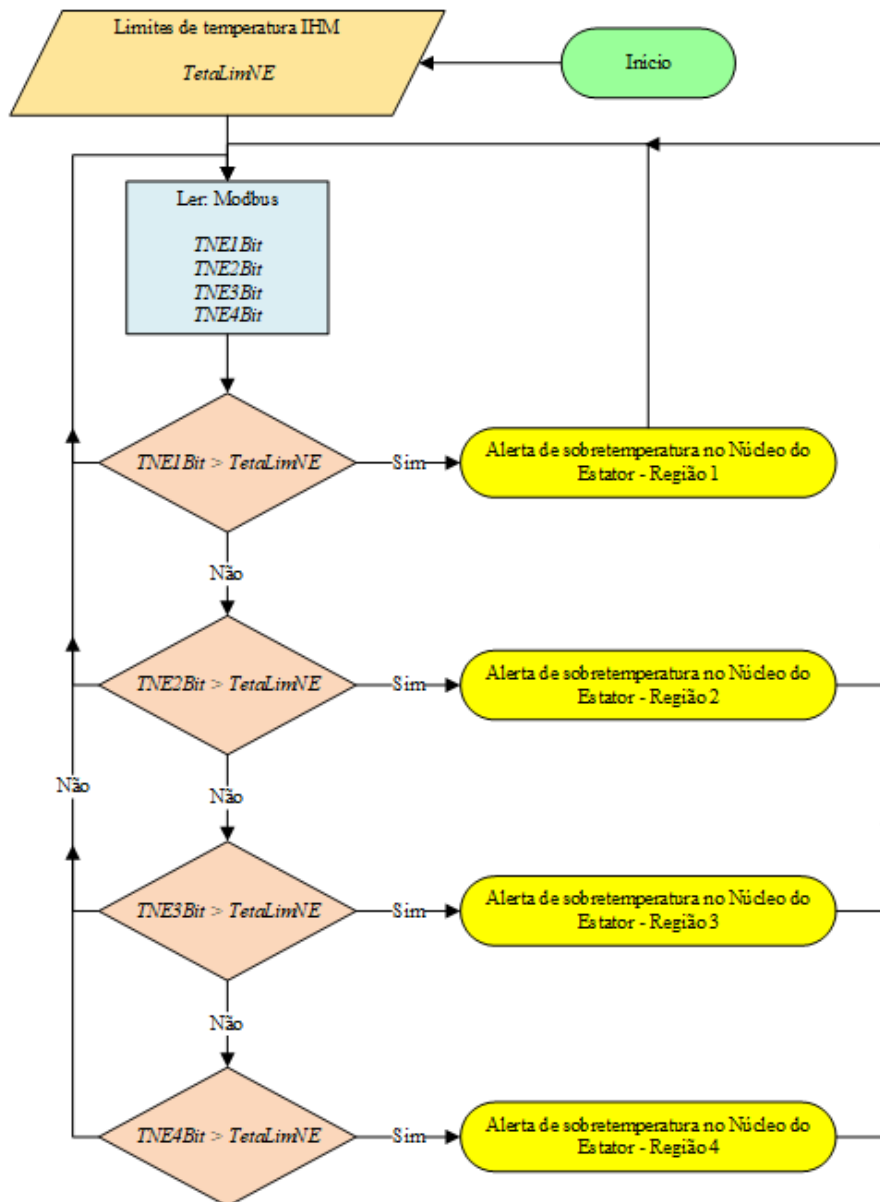


Figura 10 - Fluxograma do teste de monitoramento da temperatura o núcleo do estator.

Assim, têm-se as seguintes condições:

$TNE1, TNE2, TNE3 \text{ e } TNE4 > Teta LimNE = \text{Alerta de problema de sob temperatura}$

Portanto, fazem-se os seguintes cálculos:

– Teste 1:

$TNE1 < Teta LimNE = 120^\circ < 130^\circ = \text{Operando normalmente}$

$TNE2 > Teta\ LimNE = 115^\circ < 130^\circ = \text{Operando normalmente}$

$TNE3 > Teta\ LimNE = 120^\circ < 130^\circ = \text{Operando normalmente}$

$TNE4 > Teta\ LimNE = 115^\circ < 130^\circ = \text{Operando normalmente}$

– Teste 2:

$TNE1 < Teta\ LimNE = 135^\circ > 130^\circ = \text{Alerta de problema de sobretemperatura}$

$TNE2 < Teta\ LimNE = 115^\circ < 130^\circ = \text{Operando normalmente}$

$TNE3 > Teta\ LimNE = 120^\circ < 130^\circ = \text{Operando normalmente}$

$TNE4 > Teta\ LimNE = 115^\circ < 130^\circ = \text{Operando normalmente}$

– Teste 3:

$TNE1 < Teta\ LimNE = 115^\circ < 130^\circ = \text{Operando normalmente}$

$TNE2 < Teta\ LimNE = 120^\circ < 130^\circ = \text{Operando normalmente}$

$TNE3 < Teta\ LimNE = 135^\circ > 130^\circ = \text{Alerta de problema de sobretemperatura}$

$TNE4 > Teta\ LimNE = 115^\circ < 130^\circ = \text{Operando normalmente}$

Portanto, têm-se a alerta de problema de sobretemperatura no núcleo do estator na região 1 para o teste 1, e na região 3 para o teste 3.

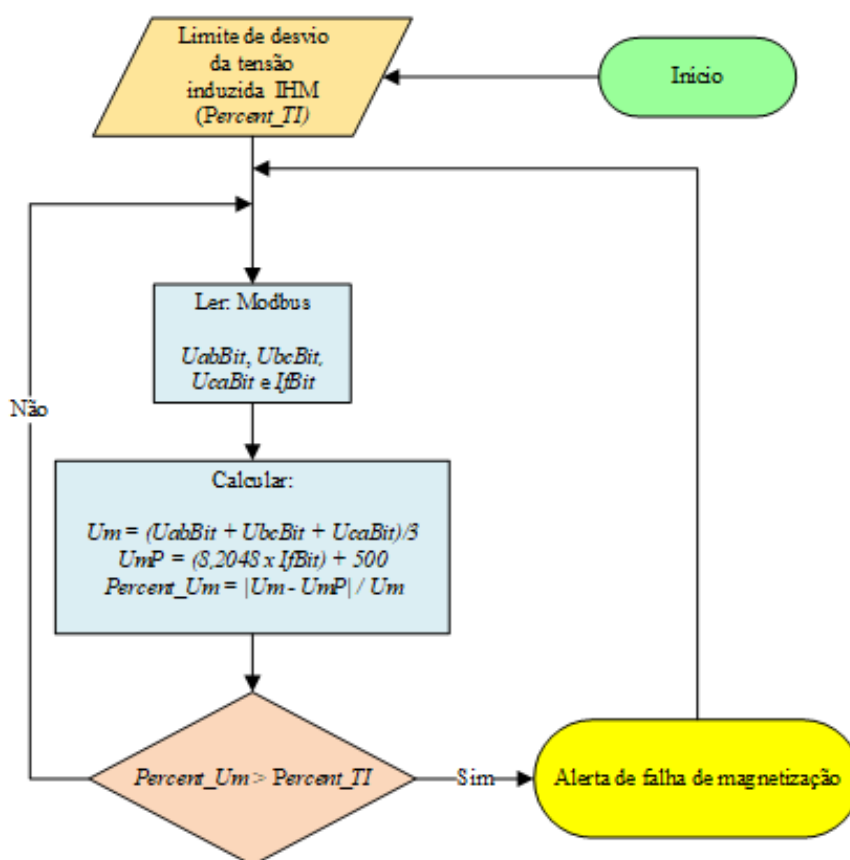
4.3.6 Teste de Operação do Circuito de Magnetização

Neste monitoramento, também se define um parâmetro, no intuito de detectar a alerta de falha de magnetização. Por meio do acompanhamento da tensão terminal do gerador em função da corrente de excitação, é possível verificar se o processo de magnetização do gerador encontra-se dentro das condições normais. A Tabela 15 apresenta as variáveis de entrada, e o respectivo parâmetro imputado.

Tabela 15 - Teste do circuito de magnetização

Variáveis medidas	T1	T2	T3
<i>UabBit</i>	13800	13800	13800
<i>UbcBit</i>	13248	13248	13248
<i>UcaBit</i>	13500	13500	13500
<i>IfBit</i>	1600	1640	1400
Parâmetro imputado			
<i>Percent_TI</i>	0,03	0,03	0,03

A Figura 11 demonstra o fluxograma deste monitoramento.

**Figura 11** - Fluxograma do teste de monitoramento do circuito de magnetização.

O teste é definido pelas seguintes equações:

$$U_m = \frac{(U_{abBit} + U_{bcBit} + U_{caBit})}{3} \quad (4.3.6.1)$$

$$UmP = (8,2048 \times IfBit) + 500 \quad (4.3.6.2)$$

$$Percent_Um = \frac{|Um - UmP|}{Um} \quad (4.3.6.3)$$

A seguir, demonstram-se os cálculos estipulados pelo fluxograma da Figura 21.

I. Parâmetro Um

- Testes 1, 2 e 3:

$$Um = \frac{(Uab + Ubc + Ucs)}{3} = \frac{(13800 + 13248 + 13500)}{3} = 13516 \text{ V}$$

II. Parâmetro UmP

- Teste 1:

$$UmP = (8,2048 \times If) + 500 = 13627,68 \text{ V}$$

- Teste 2:

$$UmP = (8,2048 \times If) + 500 = 13955,871 \text{ V}$$

- Teste 3:

$$UmP = (8,2048 \times If) + 500 = 11986,72 \text{ V}$$

III. Parâmetro $Percent_Um$

- Teste 1:

$$\text{Percent}_{Um} = \frac{|Um - UmP|}{Um} = 0,0083$$

– Teste 2:

$$\text{Percent}_{Um} = \frac{|Um - UmP|}{Um} = 0,0325$$

– Teste 3:

$$\text{Percent}_{Um} = \frac{|Um - UmP|}{Um} = 0,1131$$

Entretanto, têm-se:

$$\text{Percent}_{Um} > \text{Percent}_{TI} = \text{Alerta de falha na magnetização}$$

Portanto, para cada transformador, fazem-se os seguintes cálculos:

– Teste 1:

$$\text{Percent}_{Um} > \text{Percent}_{TI} = 0,0083 < 0,03 = \text{Operando normalmente}$$

– Teste 2:

$$\text{Percent}_{Um} > \text{Percent}_{TI} = 0,0325 > 0,03 = \text{Alerta de falha na magnetização}$$

– Teste 3:

$$\text{Percent}_{Um} > \text{Percent}_{TI} = 0,1131 > 0,03 = \text{Alerta de falha na magnetização}$$

Sendo assim, têm-se a alerta de falha de magnetização para os testes 2 e 3.

4.3.7 Teste de Operação da Temperatura do Rotor

A correlação entre a tensão de excitação (U_f) e a corrente de excitação (I_f) definem a resistência ao fluxo através do circuito de campo. Tem-se que esse valor de resistência varia com a temperatura, e pode ser usado para estimar a temperatura de operação instantânea do circuito.

De acordo com a análise das características do gerador e sistema de excitação realizados com os dados de fabricação, comissionamento e ensaios de performance, definiram-se valores para a resistência do rotor. A Tabela 16 apresenta estes respectivos valores.

Tabela 16 - $R_{rotor} = f(Temp)$

<i>Rrotor [Ohm]</i>	<i>Temp [°C]</i>
0,078	20
0,102406	100
0,10879	120

Assim, obteve-se o comportamento da resistência (Ohm) em função da temperatura (°C), apresentado na Figura 12.

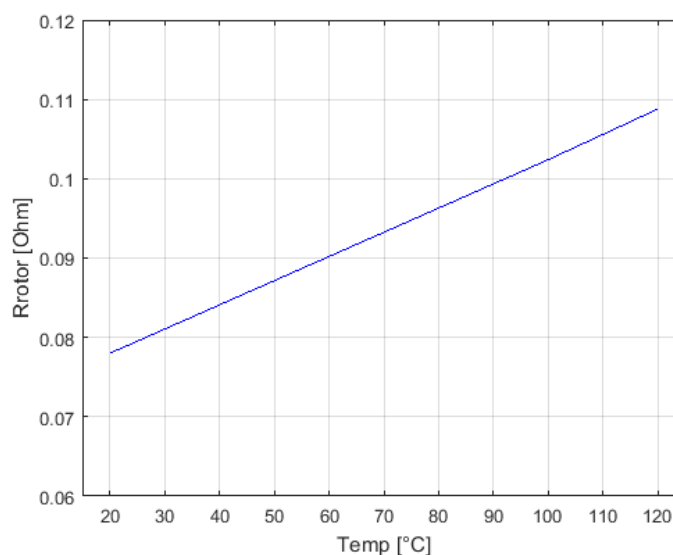


Figura 12 - Característica da resistência do rotor (Ohm) em função da temperatura (°C).

Portanto, foi possível estabelecer uma correlação para o cálculo da temperatura em um determinado instante. A Tabela 17 apresenta as variáveis medidas, e também o parâmetro imputado, com a finalidade de detectar problema de temperatura elevada.

Tabela 17 - Teste da temperatura do rotor

Variáveis medidas	T1	T2	T3
<i>UfBit</i>	152,7	152,7	165
<i>IfBit</i>	1500	1400	1500
Parâmetro imputado			
<i>TetaLim</i>	120	120	120

A Figura 13 apresenta o fluxograma deste teste de monitoramento.

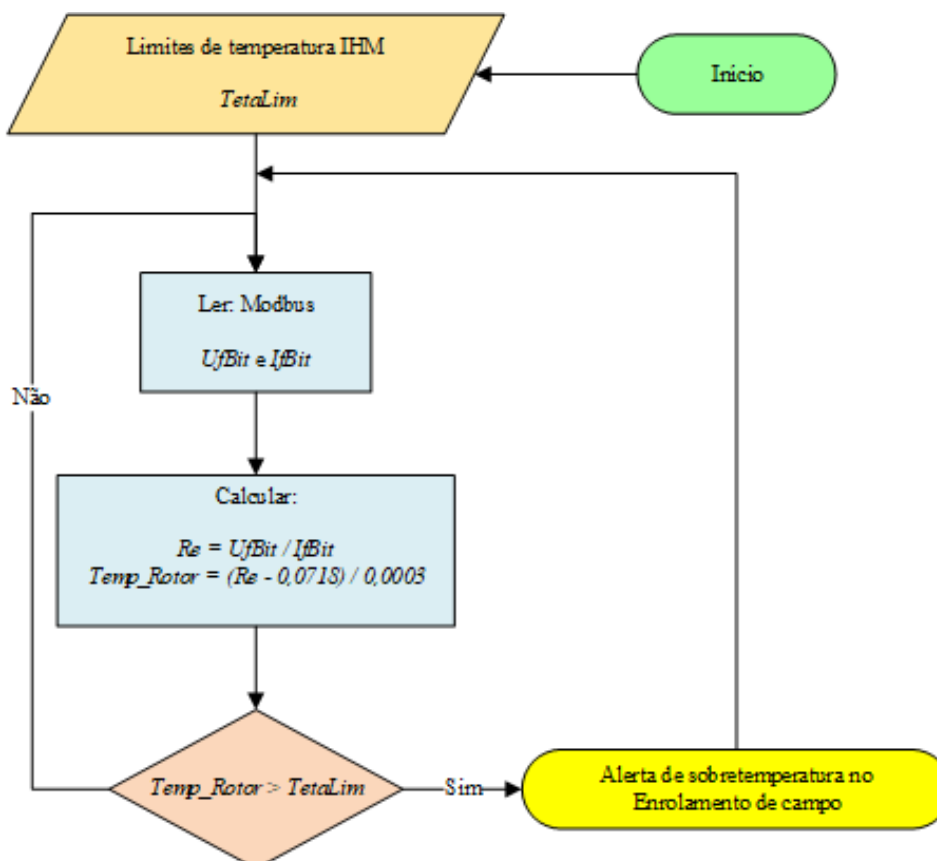


Figura 13 - Fluxograma do teste de monitoramento de operação da temperatura do rotor.

As equações que definem o teste são:

$$Re = \frac{Uf_{Bit}}{If_{Bit}} \quad (4.3.7.1)$$

$$Temp_Rotor = \frac{(Re - 0,0718)}{0,0003} \quad (4.3.7.2)$$

A seguir, demonstram-se os cálculos estipulados pelo fluxograma da Figura 13. Na sequência, em relação ao parâmetro imputado, realizam-se as comparações para a detecção ou não de alerta de sobretemperatura.

I. Parâmetro Re

– Teste 1:

$$Re_1 = \frac{Uf_1}{If_1} = \frac{152,7}{1500} = 0,1018 \Omega$$

– Teste 2:

$$Re_2 = \frac{Uf_2}{If_2} = \frac{152,7}{1400} = 0,1091 \Omega$$

– Teste 3:

$$Re_3 = \frac{Uf_3}{If_3} = \frac{165}{1500} = 0,11 \Omega$$

II. Parâmetro $Temp_Rotor$

– Teste 1:

$$TempRotor_1 = \frac{Re_1 - 0,00718}{0,0003} = 100^\circ$$

– Teste 2:

$$TempRotor_2 = \frac{Re_2 - 0,00718}{0,0003} = 124,2381^\circ$$

– Teste 3:

$$TempRotor_3 = \frac{Re_3 - 0,00718}{0,0003} = 127,333^\circ$$

No entanto, têm-se:

$$TempRotor > TetaLim = \text{Alerta de sobretemperatura no enrolamento de campo}$$

Portanto, fazem-se os seguintes cálculos:

– Teste 1:

$$TempRotor_1 < TetaLim = 100^\circ < 120^\circ = \text{Operando normalmente}$$

– Teste 2:

$$\begin{aligned} TempRotor_2 < TetaLim = 124,2381^\circ > 120^\circ \\ = \text{Alerta de sobretemperatura no enrolamento de campo} \end{aligned}$$

– Teste 3:

$$\begin{aligned} TempRotor_3 > TetaLim = 127,333^\circ > 120^\circ \\ = \text{Alerta de sobretemperatura no enrolamento de campo} \end{aligned}$$

Sendo assim, têm-se a alerta de sobretemperatura no enrolamento de campo para os testes 2 e 3.

4.3.8 Teste de Operação do Circuito Hidráulico

Na análise do desempenho do sistema hídrico, têm-se a seguir a representação da curva adaptada pela fornecida do fabricante do gerador, na qual indica o rendimento do gerador em função da potência ativa, sendo expressa em valores “por unidade”.

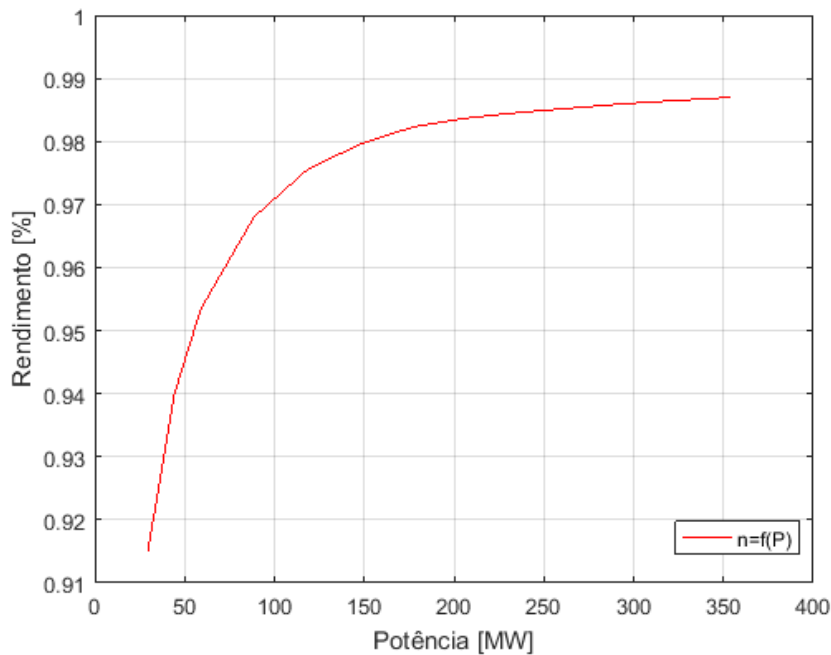


Figura 14 - Rendimento em função da potência ativa [MW] fornecida pelo gerador.

Esta curva característica deste gerador é expressa por:

$$\eta = f(S_{pu}) \quad (4.3.8.1)$$

Por definição, têm-se:

$$S_{pu} = \frac{S}{S_{base}} \quad (4.3.8.2)$$

E também,

$$S = \frac{P}{FP} \quad (4.3.8.3)$$

Então,

$$S_{pu} = \frac{P}{(FP \times S_{base})} \quad (4.3.8.4)$$

Logo,

$$P = FP \times S_{base} \times S_{pu} \quad (4.3.8.5)$$

Para este gerador, têm-se $FP = 0,95$ e $S_{base} = 311$ [MVA]. Portanto, substituindo estes valores na equação (4.3.8.5), têm-se:

$$P = 0,95 \times 311 \times S_{pu}$$

$$P = 295,45 \times S_{pu} \text{ [MW]}$$

A partir deste resultado, e observando-se os valores de η da Figura 14, define-se a seguinte relação:

Tabela 18 - Rendimento x Potência

S [pu]	P [MW]	η
0,1	29,545	0,915
0,15	44,3175	0,94
0,2	59,09	0,9535
0,3	88,635	0,968
0,4	118,18	0,9755
0,5	147,725	0,9796
0,6	177,27	0,9823
0,7	206,815	0,9837
0,8	236,36	0,9846
0,9	265,905	0,9853
1	295,45	0,986
1,1	324,995	0,9865
1,2	354,54	0,987

Os valores são de potência ativa fornecida pelo gerador, em [MW]. Assim, para cada valor de potência ativa gerada, é possível calcular a potência mecânica disponibilizada pela turbina no eixo (PMC). Para determinar o valor do rendimento para qualquer valor de potência gerada, pode-se linearizar a curva de rendimento $P = f(\eta)$. No

entanto, deve-se definir os intervalos de potência nos quais a curva é melhor representada por uma reta. Deste modo, tem-se:

- **Reta 1:** Nesse intervalo, tem-se a potência, em [MW], variando entre:

$$29,545 \leq P \leq 44,3175$$

Neste caso, tem-se o rendimento dado por:

$$\eta = (0,1692 \times P) + 86,5 \text{ [%]} \quad (4.3.8.6)$$

- **Reta 2:** Nesse intervalo, tem-se a potência, em [MW], variando entre:

$$44,3175 \leq P \leq 59,09$$

Neste caso, tem-se o rendimento dado por:

$$\eta = (0,10154 \times P) + 89,5 \text{ [%]} \quad (4.3.8.7)$$

- **Reta 3:** Nesse intervalo, tem-se a potência, em [MW], variando entre:

$$59,09 \leq P \leq 73,8625$$

Neste caso, tem-se o rendimento dado por:

$$\eta = (0,067639 \times P) + 91,5 \text{ [%]} \quad (4.3.8.8)$$

- **Reta 4:** Nesse intervalo, tem-se a potência, em [MW], variando entre:

$$73,8625 \leq P \leq 103,4075$$

Neste caso, tem-se o rendimento dado por:

$$\eta = (0,02077 \times P) + 94,5 \text{ [%]} \quad (4.3.8.9)$$

- **Reta 5:** Nesse intervalo, tem-se a potência, em [MW], variando entre:

$$103,4075 \leq P \leq 147,725$$

Neste caso, tem-se o rendimento dado por:

$$\eta = (0,013538 \times P) + 86,5 \text{ [%]} \quad (4.3.8.10)$$

- **Reta 6:** Nesse intervalo, tem-se a potência, em [MW], variando entre:

$$147,725 \leq P \leq 177,27$$

Neste caso, tem-se o rendimento dado por:

$$\eta = (0,010154 \times P) + 96,4 \text{ [%]} \quad (4.3.8.11)$$

- **Reta 7:** Nesse intervalo, tem-se a potência, em [MW], variando entre:

$$177,27 \leq P \leq 206,815$$

Neste caso, tem-se o rendimento dado por:

$$\eta = (0,067693 \times P) + 97 \text{ [%]} \quad (4.3.8.12)$$

- **Reta 8:** Nesse intervalo, tem-se a potência, em [MW], variando entre:

$$206,815 \leq P \leq 295,45$$

Neste caso, tem-se o rendimento dado por:

$$\eta = (0,0022564 \times P) + 97,93 \text{ [%]} \quad (4.3.8.13)$$

- **Reta 9:** Nesse intervalo, tem-se a potência, em [MW], variando entre:

$$295,45 \leq P \leq 354,54$$

Neste caso, tem-se o rendimento dado por:

$$\eta = (0,0016923 \times P) + 98,1 \text{ [%]} \quad (4.3.8.14)$$

A Tabela 19 relaciona a potência disponibilizada pela turbina, no eixo do gerador (*Peixo*), com o valor percentual da abertura do distribuidor (*AbeD*). Estes dados foram obtidos para um determinado valor de queda bruta, definido em 176 m.

Tabela 19 - *AbeD* x *Peixo*

<i>AbeD</i> [%]	<i>Peixo</i> [MW]
0	0
18,8	30
26	60
34	90
40,8	120
46	150
52,8	180
59	210
67	240
75,8	270

Desta forma, a partir de um valor conhecido da potência ativa produzida pelo gerador, pode-se selecionar em qual desses nove intervalos este se encaixa, e calcular o valor da potência mecânica calculada (*PMC*). Mediante os dados de ensaio de

comissionamento, foram estabelecidas equações linearizadas que permitem estimar o valor da potência mecânica disponibilizada no eixo da turbina (*Peixo*), para a queda bruta em que o ensaio foi realizado.

Tabela 20 - Equações linearizadas de *Peixo*

Intervalo de <i>AbeD</i>	Equação representativa da reta no intervalo
0 a 18,8	$Peixo = (30/18,8) \times AbeD$
18,8 a 26	$Peixo = (30/7,2) \times AbeD - 48,33$
26 a 34	$Peixo = (30/8) \times AbeD - 37,5$
34 a 40,8	$Peixo = (30/6,8) \times AbeD - 60$
40,8 a 46	$Peixo = (30/5,2) \times AbeD - 115,4$
46 a 52,8	$Peixo = (30/6,8) \times AbeD - 52,94$
52,8 a 59	$Peixo = (30/6,2) \times AbeD - 75,48$
59 a 67	$Peixo = (30/8) \times AbeD - 11,25$
67 a 75,8	$Peixo = (30/8,8) \times AbeD + 11,59$
75,8 a 86,6	$Peixo = (30/11) \times AbeD + 63,27$

A Tabela 21 apresenta as variáveis medidas para o teste de monitoramento do circuito hidráulico.

Tabela 21 - Teste da operação do circuito hidráulico

Variáveis medidas	T1	T2	T3
<i>PBit</i>	58	54	48
<i>AngBit</i>	8,16	8	7,8
<i>H1Bit</i>	196	196	196
<i>H2Bit</i>	15	15	15
Parâmetro imputado			
<i>Percent_Delta_PM</i>	0,06	0,06	0,06

A Figura 15 apresenta o fluxograma deste monitoramento.

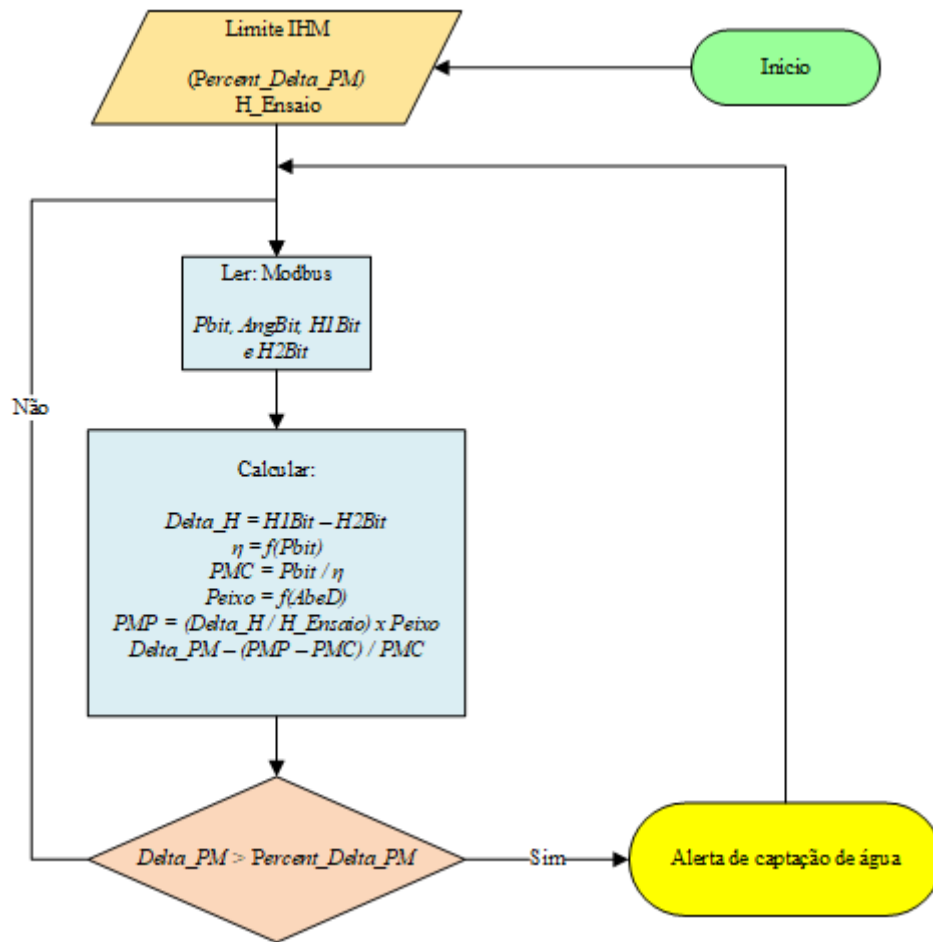


Figura 15 - Fluxograma do teste de monitoramento do circuito hidráulico.

As equações que estabelecem o teste são descritas por:

$$\Delta H = H1Bit - H2Bit \quad (4.3.8.15)$$

$$\eta = f(PBit) \quad (4.3.8.16)$$

$$PMC = \frac{PBit}{\eta} \quad (4.3.8.17)$$

$$Peixo = f(AbeD) \quad (4.3.8.18)$$

$$PMP = \left(\frac{\Delta H}{H_{\text{Ensaio}}} \right) \times \text{Peixo} \quad (4.3.8.19)$$

$$\Delta_{PM} = \frac{(PMP - PMC)}{PMC} \quad (4.3.8.20)$$

A seguir, demonstram-se os cálculos estipulados pelo fluxograma da Figura 15. Na sequência, em relação ao parâmetro imputado, realizam-se as comparações para a detecção ou não de alerta de captação de água.

I. Parâmetro ΔH

- Testes 1, 2 e 3:

$$\Delta H = H_{1\text{Bit}} - H_{2\text{Bit}} = 196 - 15 = 181 \text{ m}$$

II. Parâmetro PMC

- Teste 1: Para a potência ativa (P_{Bit}) de 58 MW, e de acordo com a definição dos cálculos das potências mecânicas prevista (PMP) e potência mecânica calculada (PMC), utiliza-se a equação (4.3.8.7), referente à reta 2, para a determinação do rendimento.

Assim, têm-se:

$$\eta = (0,10154 \times P_{Bit}) + 89,5 = 95,38932 = 0,9538932 \%$$

Então,

$$PMC = \frac{P_{Bit}}{\eta} = \frac{58}{0,9538932} = 60,8035 \text{ MW}$$

- Teste 2: Para a P_{Bit} de 54 MW, também se utiliza a reta 2 para a determinação do rendimento.

Portanto,

$$PMC = \frac{P_{Bit}}{\eta} = \frac{54}{0.9538932} = 56,610 \text{ MW}$$

- Teste 3: Para a P_{Bit} de 48 MW, novamente se tem a reta 2 para a determinação do rendimento.

Assim,

$$PMC = \frac{P_{Bit}}{\eta} = \frac{48}{0.9538932} = 50,32 \text{ MW}$$

III. Parâmetro PMP

Em conformidade com a curva de operação, têm-se a característica da abertura do distribuidor em função do sinal de controle.

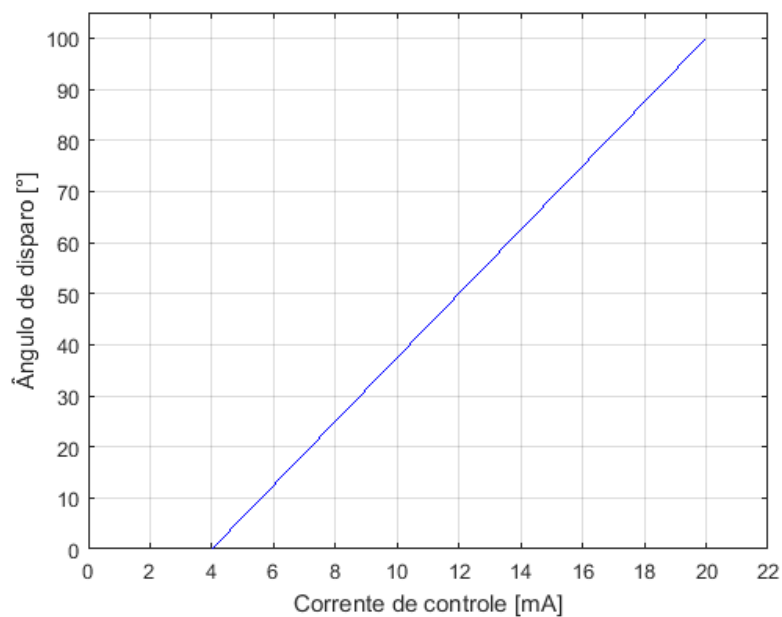


Figura 16 - Aberturas do distribuidor em função do sinal de controle.

- Teste 1: Para um valor de corrente corresponde à abertura percentual do distribuidor (A_{beD}) de 8,16 mA, faz-se a seguinte relação:

$$\frac{100}{AbeD} = \frac{20 - 4}{8,16 - 4} \therefore \frac{100}{AbeD} = \frac{16}{4,16} \therefore AbeD = 26 \%$$

Portanto, para uma abertura de 26 %, e a partir dos dados de ensaio de comissionamento apresentados na Tabela 27, define-se a operação pelas equações linearizadas no intervalo de 18,8 a 26%.

Portanto,

$$Peixo = ((30/7,2) \times AbeD) - 48,33 = 60 \text{ MW}$$

Logo,

$$PMP = ((H1Bit - H2Bit)/176) \times Peixo = 61,705 \text{ MW}$$

- Teste 2: Para um valor de corrente corresponde à abertura percentual do distribuidor (*AbeD*) de 8 mA, têm-se:

$$\frac{100}{AbeD} = \frac{20 - 4}{8 - 4} \therefore \frac{100}{AbeD} = \frac{16}{3,8} \therefore AbeD = 25 \%$$

Portanto, para uma abertura de 25 %, também se têm a operação definida pelas equações linearizadas no intervalo de 18,8 a 26%.

Assim,

$$Peixo = ((30/7,2) \times AbeD) - 48,33 = 55,836 \text{ MW}$$

Desde modo,

$$PMP = ((H1Bit - H2Bit)/176) \times Peixo = 57,423 \text{ MW}$$

- Teste 3: Para um valor de corrente corresponde à abertura percentual do distribuidor (*AbeD*) de 7,8 mA, têm-se:

$$\frac{100}{AbeD} = \frac{20 - 4}{12,17 - 4} \therefore \frac{100}{AbeD} = \frac{16}{8,17} \therefore AbeD = 23,75 \%$$

Portanto, para uma abertura de 23,75 %, novamente a operação é definida pelas equações linearizadas no intervalo de 18,8 a 26%.

Desta maneira,

$$Peixo = ((30/7,2) \times AbeD) - 48,33 = 50,6283 \text{ MW}$$

Sendo assim,

$$PMP = ((H1Bit - H2Bit)/176) \times Peixo = 52,0974 \text{ MW}$$

IV. Parâmetro *Delta_PM*

– Teste 1:

$$Delta_PM = \frac{(PMP - PMC)}{PMC} = 0,02842$$

– Teste 2:

$$Delta_PM = \frac{(PMP - PMC)}{PMC} = 0,01436$$

– Teste 3:

$$Delta_PM = \frac{(PMP - PMC)}{PMC} = 0,03532$$

No entanto, têm-se:

$$Delta_PM > Percent_Delta_PM = \text{Alerta de problema na captação de água}$$

Portanto, realizam-se os seguintes cálculos dos percentuais:

- Teste 1:

$$\Delta_{PM} < \text{Percent_Delta_PM} = \text{Operando normalmente}$$

- Teste 2:

$$\Delta_{PM} > \text{Percent_Delta_PM} = \text{Operando normalmente}$$

- Teste 3:

$$\Delta_{PM} > \text{Percent_Delta_PM} = \text{Operando normalmente}$$

Sendo assim, com a comparação dos valores imputados e calculados, têm-se a operação normal para os três testes em análise.

CAPÍTULO 5

5 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS (DOE)

5.1 Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos

Experimentos são feitos em todas as disciplinas científicas e de engenharia e são uma importante parte da maneira de aprendermos sobre como sistemas e processos funcionam. A validade das conclusões que são retiradas de um experimento depende em grande extensão de como este foi conduzido. Conseqüentemente, o planejamento do experimento desenvolve o papel principal na solução futura do problema que inicialmente motivou o experimento. (MONTGOMERY, 2009)

Os conceitos das técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos (DOE – *Design of Experiments*) são uma das formas de alcançar as características de competitividade ou fatores críticos, e buscam melhorar a qualidade no desenvolvimento de produtos e processos de fabricação, e assim, atender as necessidades e expectativas dos consumidores. (COLOMBARI, 2004)

O experimento projetado ou planejado é um teste ou uma série de testes nos quais se induzem mudanças deliberadas nas variáveis de entrada do processo ou sistema, de maneira que seja possível observar e identificar as causas das mudanças nas respostas ou variáveis de saída. Portanto, é fundamental entender que a saída de um processo é o resultado da interação de fatores. A Figura 17 demonstra o modelo geral de um sistema ou processo.

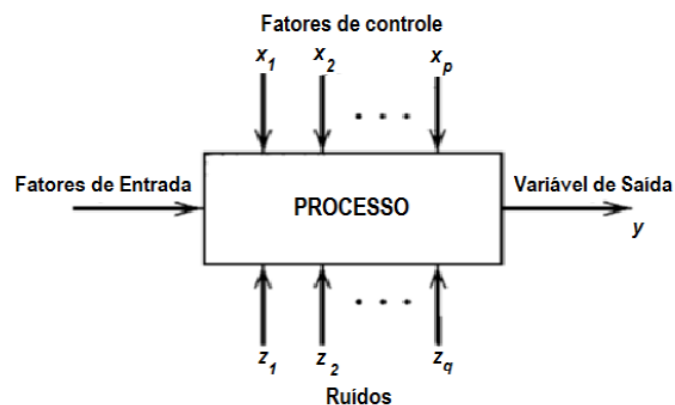


Figura 17 - Modelo Geral de um Processo ou Sistema.

Fonte: Adaptado de Montgomery (2000)

5.2 Estrutura do Planejamento e Análise de Experimentos

Para a realização dos experimentos é de suma importância realizar as atividades de maneira planejada, com a finalidade de garantir uma maior confiabilidade das informações obtidas, e assim, gerar ações de melhoria mais eficientes. Este pode ser estruturado da seguinte maneira: (BARKER;MILIVOJEVICH, 2016) (COLOMBARI, 2004) (NUNES JÚNIOR, 2012)

- *Definição do experimento:* Nesta primeira etapa, deve-se levantar o máximo de informações acerca do problema em estudo, e assim, evitar o aparecimento de imprevistos não considerados inicialmente.
- *Fatores e seus níveis de controle:* O objetivo é avaliar o efeito produzido na resposta, e com isso, determinar os principais fatores do processo. Estes podem ser divididos em fatores de controle quantitativos e qualitativos, e serem representados por variáveis numéricas ou de texto.
- *Variáveis de resposta:* Estas são as variáveis dependentes que sofrem alguma alteração durante a realização do experimento. Nesta etapa deve-se garantir que as informações prévias são suficientes para a correta análise e solução do experimento.
- *Projeto experimental:* Definem-se o tipo de análise em consideração ao tempo, custo, dificuldades e objetivos pretendidos.
- *Experimento:* Neste realiza-se a coleta de dados.
- *Análise de dados:* A utilização de dados estatísticos para a avaliação dos resultados e conclusões. Para tal, têm-se *softwares* de apoio que facilitam a execução da atividade.
- *Finalização do trabalho:* A última etapa do experimento refere-se às conclusões através de resultados obtidos.

Após a criação de um roteiro para a aplicação da metodologia de Planejamento de Experimentos, também se faz necessário o conhecimento das definições a seguir:

- *Fatores de Controle*: são os fatores que podem ser alterados durante o experimento. Essas alterações visam avaliar o efeito produzido nas variáveis de resposta e, com isso pode-se determinar os principais fatores do processo. Estes fatores podem ser divididos em quantitativos (temperatura, corrente, tensão, etc.) e qualitativos (diferentes máquinas, sim / não, liga / desliga etc.).
- *Níveis dos fatores*: são as condições de operação dos fatores de controle investigados nos experimentos.
- *Tratamentos*: é a combinação dos níveis de fatores de controle, isto significa que cada uma das combinações do experimento representará um tratamento.
- *Efeito principal*: é a diferença média observada na resposta quando se muda o nível do fator de controle investigado.
- *Efeito de interação*: ocorre quando são estudados dois ou mais fatores, considerando-se as combinações entre os fatores.
- *Variáveis de saída*: são as variáveis que dependem dos estímulos causados nos fatores de controle, ou seja, sofrem algum efeito nos testes, quando estímulos são dados intencionalmente nos fatores de controle do determinado processo em estudo. Podem existir uma ou mais variáveis de resposta.
- *Matriz de experimentos*: é a matriz construída para a realização dos experimentos. Nela estão incluídos os fatores de controle, os níveis e tratamentos do experimento.

5.3 Aplicação da Metodologia DOE

O planejamento de experimentos (DOE) tem sua utilização em inúmeras aplicações. A experimentação faz parte do processo científico e de aprendizagem sobre o

comportamento de sistemas ou processos. Para uma abordagem estatística, é necessário ter uma ideia a respeito do que será avaliado, um prévio estudo dos dados, bem como um conhecimento qualitativo de sua aplicação. Com o propósito de facilitar o entendimento, JÚNIOR (2003) apresenta uma síntese das principais técnicas, apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 - Características das principais técnicas de planejamento de experimentos

Projeto Experimental	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
<i>Fatorial Completo</i> 2^k	Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis.	Não identifica variação intermediária, pois, trabalha apenas em dois níveis. Demanda um alto número de triagens para problemas que possuem grande número de variáveis.	Em processos onde há domínio prévio e onde a realização das triagens não demanda maior tempo ou custo.
<i>Fatorial Fracionado</i> $2^{(k-1)}$	Permite uma análise prévia do processo com número reduzido de triagens.	Não promove a varredura completa da região.	Em processos onde se deseja um conhecimento prévio e onde a literatura é limitada. Triagens que demandam maior tempo ou custo.
<i>Taguchi</i>	Permite a análise do processo que possui muitas variáveis de entrada com número reduzido de experimentos.	Fornece uma ideia do processo, mas pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis.	Processo onde se deseja um conhecimento prévio de comportamento. Processos que possuem dispersão elevada ou em que triagens demandam alto custo ou tempo.
<i>Metodologia de Superfície de Resposta (MSR)</i>	Permite a verificação de variações intermediárias do processo.	Pode apresentar erros na extrapolação dos níveis extremos, pois poucas triagens são realizadas nestes níveis.	Otimização de processos, principalmente quando os mesmos são bem conhecidos e com baixa dispersão.

Fonte: Adaptado de Júnior (2003)

De acordo com Douglas (1991), entende-se por projeto como uma matriz onde as colunas representam os fatores de entrada e cada linha representa a combinação de seus níveis. A escolha do projeto envolve o tamanho da amostra, a ordem de corrida do experimento e as restrições impostas para compor a matriz final gerada para saída.

5.3.1 Fatorial Completo

Planejamentos fatoriais são frequentemente usados nos experimentos envolvendo vários fatores em que é necessário estudar o efeito conjunto dos fatores sobre uma resposta. O Planejamento fatorial é particularmente útil nos estágios iniciais de um trabalho experimental, quando muitos fatores são prováveis de serem investigados. Neste definem-se dois níveis de cada fator, que fornece o menor número de corridas para as quais os k fatores podem ser estudados em um planejamento fatorial completo.

5.3.2 Superfície de Resposta (MSR)

A metodologia da superfície de resposta, ou MSR, é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas que são úteis para modelagem e análise nas aplicações em que a resposta de interesse seja influenciada por variáveis, e o objetivo seja otimizar essa resposta. Este método é utilizado para aumentar a produtividade, melhoria na qualidade dos processos e redução no tempo de desenvolvimento dos produtos.

Na maioria dos problemas de MSR, a forma da relação entre a resposta e as variáveis independentes é desconhecida. Assim, a primeira etapa é encontrar uma aproximação adequada para a relação verdadeira entre Y e as variáveis independentes. Geralmente emprega-se um polinômio de baixo grau em alguma região das variáveis independentes. Se a resposta for bem modelada por uma função linear destas variáveis, então a função de aproximação será o modelo de primeira ordem, dado por:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (5.3.2.1)$$

Entretanto, se houver curvatura no sistema, então um polinômio de maior grau tem de ser usado, tal como o modelo de segunda ordem. O polinômio de segunda ordem que representa significativamente a superfície de resposta é definido por: (DE FREITAS GOMES et al., 2012) (SILVA, 2016) (SABIONI, 2018)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (5.3.2.2)$$

Onde:

Y é a resposta de interesse,

k é o número de variáveis independentes,

β são os coeficientes estimados,

x são os parâmetros, e

ϵ é o termo de erro experimental associado.

Após a construção do modelo, deve-se avaliar se o mesmo apresenta significância estatística. Esta verificação pode ser feita através de um procedimento de ANOVA (Análise de Variância), que permite avaliar o ajuste do modelo e também verificar quais são os termos significativos deste modelo. O ajuste é representado por meio do coeficiente de determinação (R^2), que representa o percentual de variação na resposta que é explicada pelo modelo matemático. Associado a este coeficiente, encontra-se o R^2 ajustado ($(R^2_{(adj.)})$), que considera o fato de que R^2 tende a superestimar a quantidade atual de variação nos dados. (GOMES, 2010)

5.4 DOE: Análises Gráficas e Resultados

Nesta seção demonstram-se a aplicação do DOE para três exemplos de testes de monitoramento das usinas. Os cálculos e análises gráficas foram realizadas pelo *software Minitab18®*.

5.4.1 DOE aplicado no Teste de Desequilíbrio de Tensão

Na aplicação do DOE nos testes de monitoramento, fez-se necessário primeiramente a definição dos fatores de entrada, definidas nos fluxogramas pelas variáveis medidas.

Assim como demonstrado no Capítulo 4, para cada modelo se tem a realização de três testes, cujos valores encontrados foram estabelecidos para os limites inferior e superior. Conseqüentemente, as variáveis de saída foram designadas pelos valores utilizados na comparação de indicações de alertas, sendo estes os parâmetros imputados.

Na criação do experimento definiu-se pelo Planejamento Composto Central (PCC), o qual é o tipo de superfície de resposta mais comumente utilizado. Neste seguimento, para o teste de desequilíbrio de tensão, têm-se:

- 3 fatores de entrada com 2 níveis: *Uab* (tensão entre as fases *ab*), *Ubc* (tensão entre as fases *bc*) e *Uca* (tensão entre as fases *ca*);
- 3 variáveis de saída: *Delta_1*, *Delta_2* e *Delta_3* (indicações de desequilíbrio de tensão entre fases).

A Tabela 23 exhibe a matriz de experimentos para o teste em estudo.

Tabela 23 - Matriz de experimentos para o teste de desequilíbrio de tensão

Sequência	Fatores de entrada			Variáveis de Saída		
	<i>Uab</i>	<i>Ubc</i>	<i>Uca</i>	<i>Delta_1</i>	<i>Delta_2</i>	<i>Delta_3</i>
1	13600	12240	13110	0,1047497	0,0377407	0,067009
2	13800	13248	13110	0,0412371	0,0515464	0,0103093
3	13800	12240	13500	0,1183612	0,0227618	0,0955994
4	13600	13248	13500	0,0261723	0,0074353	0,018737
5	13700	12744	13305	0,0721528	0,0298121	0,0423407
6	13700	12744	13305	0,0721528	0,0298121	0,0423407
7	13800	12240	13110	0,1195402	0,0528736	0,0666667
8	13600	13248	13110	0,0264277	0,0367886	0,0103609
9	13600	12240	13500	0,1037112	0,0076258	0,0960854
10	13800	13248	13500	0,0408405	0,0221959	0,0186446
11	13700	12744	13305	0,0721528	0,0298121	0,0423407
12	13700	12744	13305	0,0721528	0,0298121	0,0423407
13	13536,7	12744	13305	0,0600747	0,0175594	0,0425154
14	13863,3	12744	13305	0,084132	0,0419645	0,0421675
15	13700	11920,968	13305	0,1371089	0,0304424	0,1066665
16	13700	13567,032	13305	0,009832	0,0292073	0,0193753
17	13700	12744	12986,565	0,0727355	0,0542804	0,0184551
18	13700	12744	13623,435	0,0715793	0,0057327	0,0658466
19	13700	12744	13305	0,0721528	0,0298121	0,0423407
20	13700	12744	13305	0,0721528	0,0298121	0,0423407

O gráfico de Pareto é uma ferramenta que apresenta os valores absolutos dos efeitos padronizados dos fatores de entrada, do maior até o menor efeito, a fim priorizar o que deve ser monitorado com uma maior atenção. Neste, define-se uma linha de referência (P_{lenth}) para indicar quais destes efeitos são relevantes. A linha de referência para a significância estatística depende do nível de significância, denotada por α . O nível de significância é dado pelo valor de 1, subtraído do valor do nível de confiança para a análise.

Na realização dos experimentos, definiu-se o valor de 95 % de confiança, assim, resultando em um α de valor igual a 0,05. Logo, as barras que cruzam a linha de referência são estaticamente significativas. A magnitude e importância de cada fator é definida pelo seu *Valor-P*, ou *P-Value*. No caso de que este seja menor ou igual ao nível de significância, conclui-se uma associação de importância considerável entre a variável de resposta e o termo em estudo.

Simultaneamente, o gráfico de probabilidade normal demonstra os efeitos padronizados em relação a uma linha de distribuição. Os efeitos positivos aumentam a resposta quando as definições mudam do valor baixo do fator para o valor alto. Os efeitos negativos diminuem a resposta quando as definições mudam do valor baixo do fator para o valor alto do fator. Efeito mais afastados de zero no eixo X têm maior magnitude, tornando-se estatisticamente mais significativos.

A Tabela 24 apresenta os valores de P para *Delta_1*.

Tabela 24 - Valores-P para *Delta_1*

Termo	Valor-P
<i>Constante</i>	0,000
<i>Uab</i>	0,000
<i>Ubc</i>	0,000
<i>Uca</i>	0,000
<i>Uab*Uab</i>	0,000
<i>Ubc*Ubc</i>	0,000
<i>Uca*Uca</i>	0,390
<i>Uab*Ubc</i>	0,092
<i>Uab*Uca</i>	0,000
<i>Ubc*Uca</i>	0,000

A Figura 18 mostra os gráficos de Pareto e Normal de Probabilidade para *Delta_1*, definindo assim, quais os fatores mais significativos.

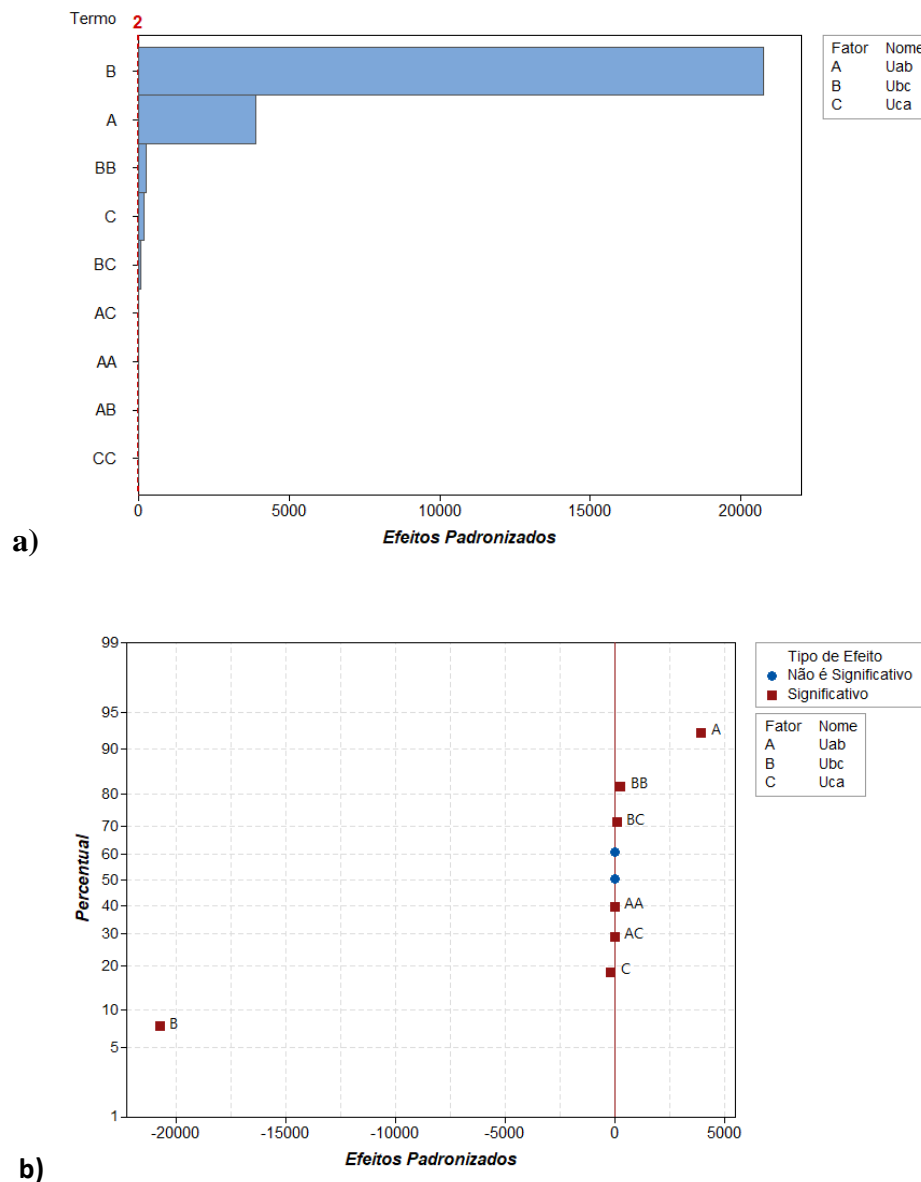


Figura 18 - a) Gráfico de Pareto e **b)** Gráfico Normal de Probabilidade para Δ_1 .

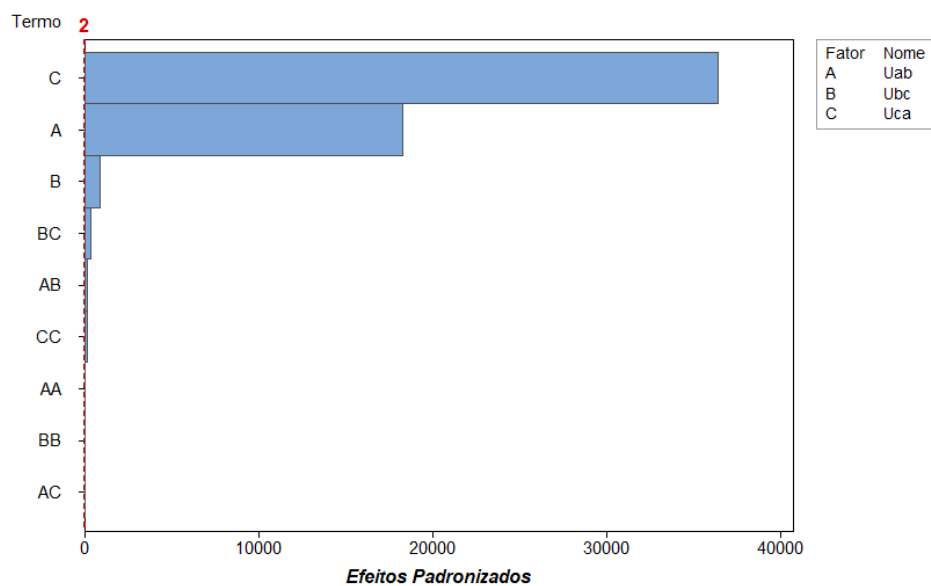
Portanto, observou-se que para Δ_1 , o fator Ubc é o mais significativo, seguido pelo Uab . Também se têm a interação $Ubc \times Ubc$, seguido por Uca e $Ubc \times Uca$ como termos significativos. A Tabela 25 apresenta os valores de P para Δ_2 .

Tabela 25 - Valores-P para Δ_2

Termo	Valor-P
Constante	0,000
Uab	0,000
Ubc	0,000

<i>Uca</i>	0,000
<i>Uab*Uab</i>	0,000
<i>Ubc*Ubc</i>	0,000
<i>Uca*Uca</i>	0,000
<i>Uab*Ubc</i>	0,000
<i>Uab*Uca</i>	0,199
<i>Ubc*Uca</i>	0,000

A Figura 19 apresenta os gráficos de Pareto e Normal de Probabilidade para *Delta_2*.



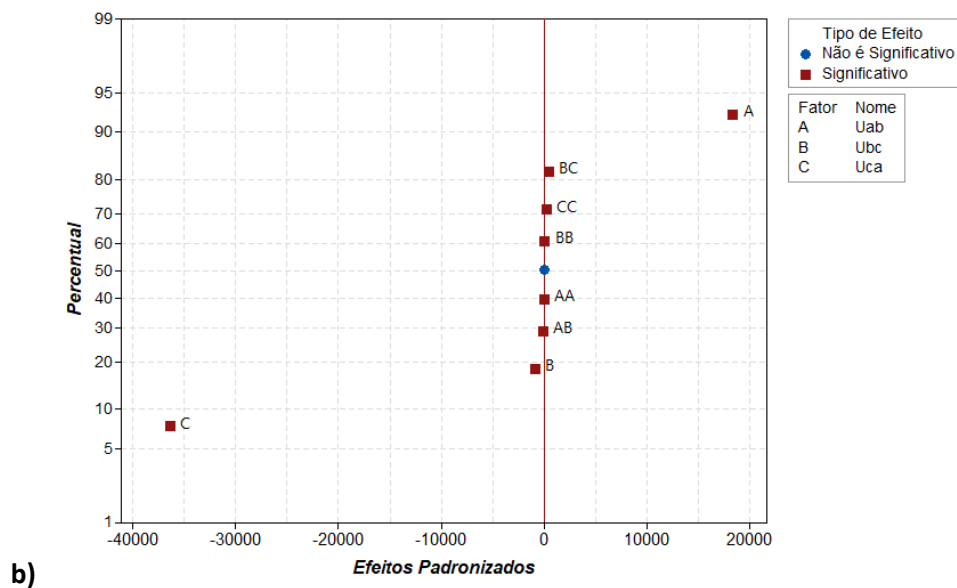


Figura 19 - a) Gráfico de Pareto e b) Gráfico Normal de Probabilidade para *Delta_2*.

Consequentemente, constatou-se que para *Delta_2*, o fator *Uca* é o mais significativo, seguido por *Uab*, *Ubc* e da interação $Ubc \times Uca$.

A Tabela 26 apresenta os valores de P para *Delta_3*.

Tabela 26 - Valores-P para *Delta_3*

Termo	Valor-P
Constante	0,000
<i>Uab</i>	0,94
<i>Ubc</i>	0,000
<i>Uca</i>	0,000
<i>Uab*Uab</i>	0,752
<i>Ubc*Ubc</i>	0,001
<i>Uca*Uca</i>	0,718
<i>Uab*Ubc</i>	0,965
<i>Uab*Uca</i>	0,991
<i>Ubc*Uca</i>	0,027

A Figura 20 demonstra os gráficos de Pareto e Normal de Probabilidade para *Delta_3*.

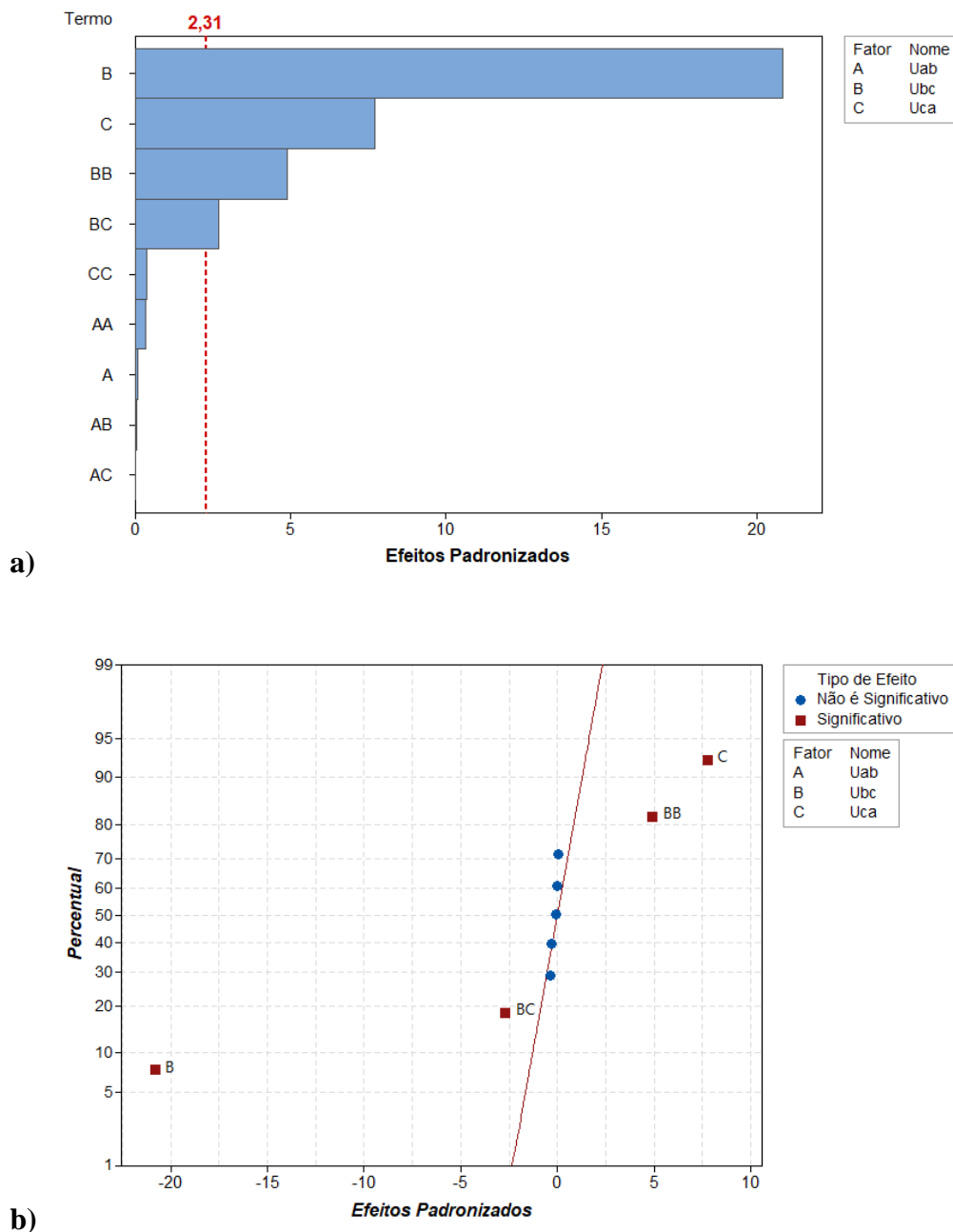


Figura 20 - a) Gráfico de Pareto e **b)** Gráfico Normal de Probabilidade para *Delta_3*.

Assim sendo, observou-se que para *Delta_3*, o fator *Ubc* é o mais significativo, seguido por *Uca*, das interações *Ubc*×*Ubc* e *Ubc*×*Uca*. Com o intuito de apresentar graficamente como os valores de saída se relacionam as variáveis de entrada, definiu-se a aplicação dos gráficos de superfície e de contorno. O gráfico de superfície exhibe a relação tridimensional em duas dimensões, com as variáveis nos eixos X e Y, e a saída (eixo Z) representada por uma superfície uniforme.

O gráfico de contorno fornece uma visão bidimensional desta superfície, em que todos os pontos que têm a mesma resposta estão ligados para produzir linhas de contorno de respostas constantes. Assim, estes juntos são úteis para determinar os valores de resposta e as condições operacionais desejáveis.

Logo, para os testes de desequilíbrio entre fases, definiu-se por:

- Eixo X: U_{ab} , U_{bc} ou U_{ca} ;
- Eixo Y: U_{ab} , U_{bc} ou U_{ca} ;
- Eixo Z: Δ_1 , Δ_2 ou Δ_3

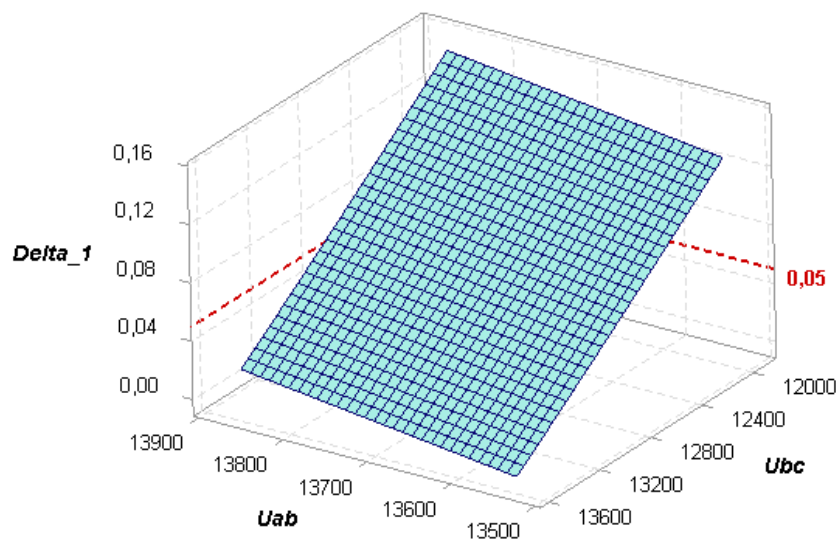
Os modelos de superfície de resposta correspondentes são dados por:

$$\Delta_1 = 0,0727 + (0,000147 \times U_{ab}) - (0,000155 \times U_{bc}) - (0,0004 \times U_{ca}) \quad (5.4.1.1)$$

$$\Delta_2 = 0,03008 + (0,000149 \times U_{ab}) - (0,000002 \times U_{bc}) - (0,000152 \times U_{ca}) \quad (5.4.1.2)$$

$$\Delta_3 = 15,8 + (0,00132 \times U_{ab}) - (0,000115 \times U_{bc}) + (0,00113 \times U_{ca}) \quad (5.4.1.3)$$

As Figuras 21, 22 e 23 apresentam respectivamente os gráficos de Superfície e de Contorno para as saídas Δ_1 , Δ_2 e Δ_3 .



a)

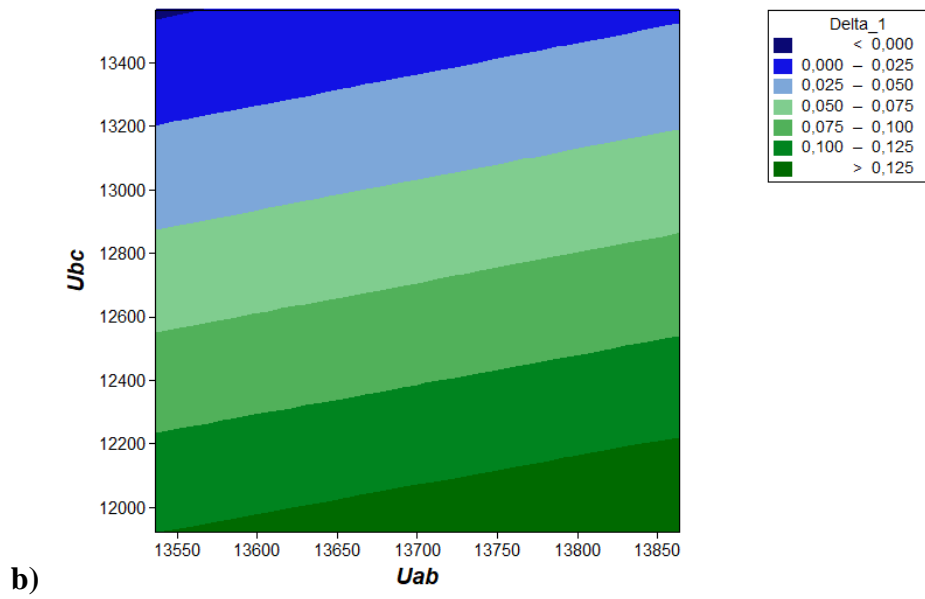
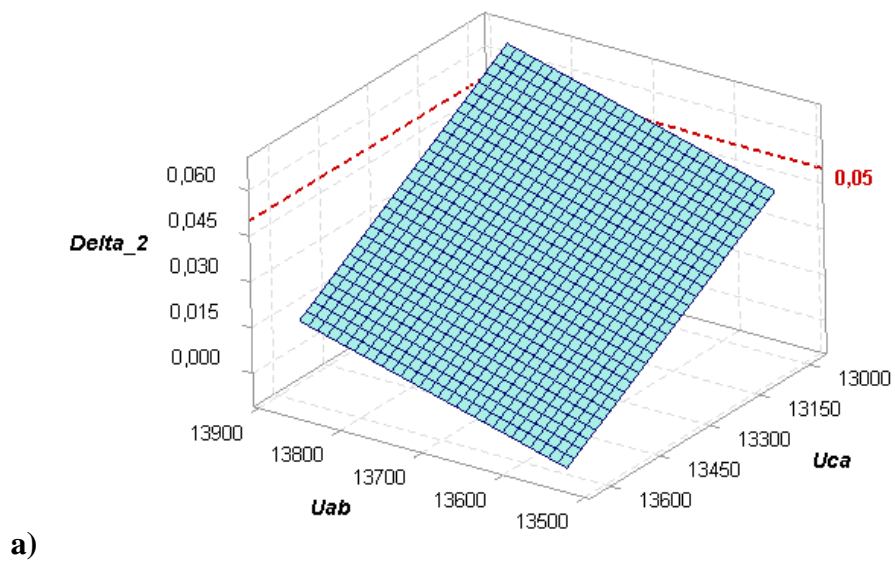


Figura 21 - a) Gráfico de Superfície e b) Gráfico de Contorno para Δ_1 .



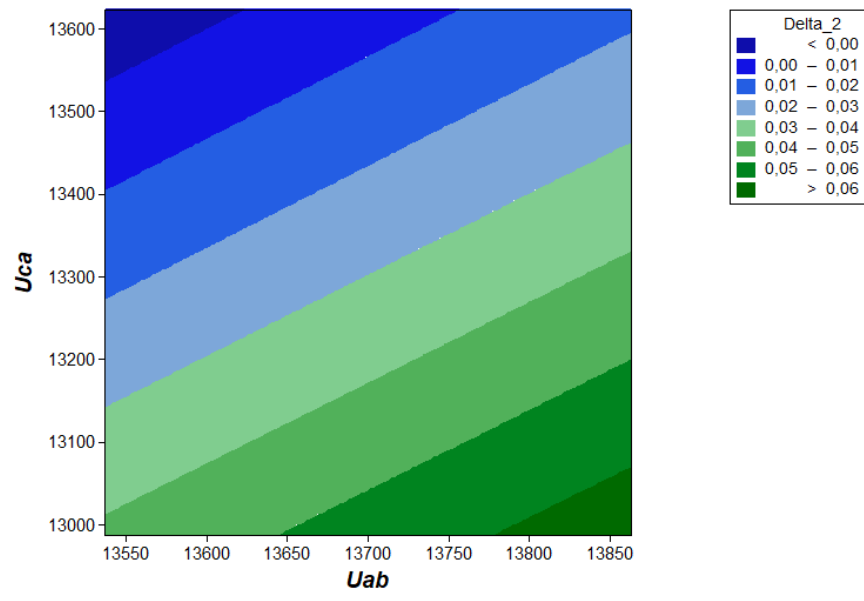
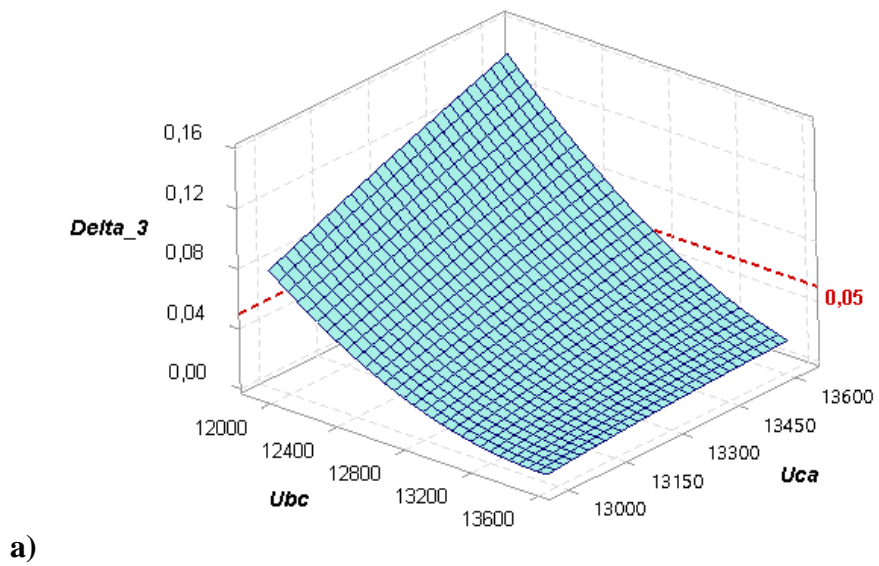


Figura 22 - a) Gráfico de Superfície e b) Gráfico de Contorno para Δ_2 .



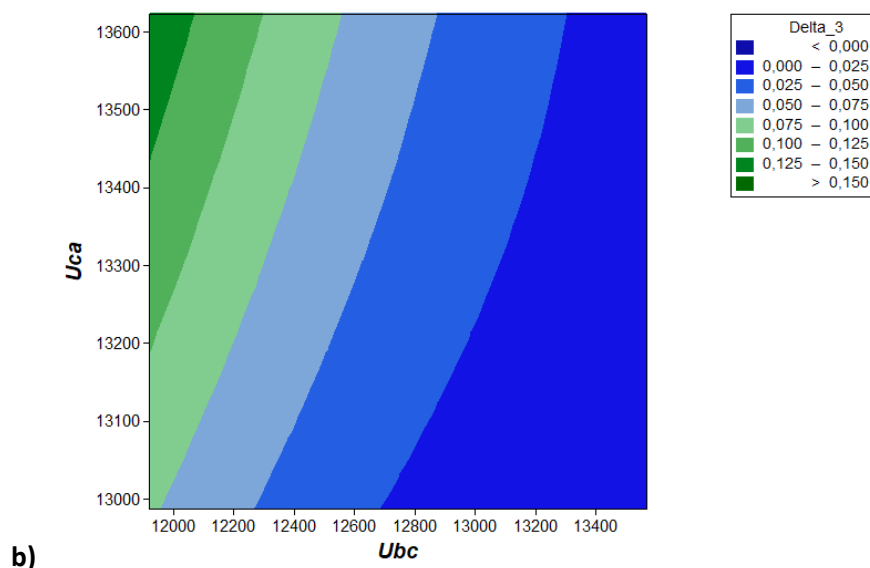


Figura 23 - a) Gráfico de Superfície e **b)** Gráfico de Contorno para Δ_3 .

Os valores definidos para indicar a alerta de desequilíbrio de tensão, que são parametrizados pelas equipes das usinas, são acompanhados pelo sistema e constantemente comparados com os valores esperados de operação. Portanto, a linha pontilhada indica o $Desvio_{IL}$, valor limite estabelecido em 0,05 p.u., ou 5% de desequilíbrio

5.4.2 DOE aplicado no Teste da Temperatura do Rotor

Neste, o DOE é aplicado para um teste que possui dois fatores de entrada, e uma saída. Assim, têm-se também a condição para exemplificar a metodologia. O emprego do DOE para o teste de monitoramento de temperatura do rotor é composto por:

- 2 fatores de entrada com 2 níveis: U_f (tensão de excitação aplicada ao campo) e I_f (corrente de excitação);
- 1 variável de saída: $Temp_{Rotor}$ (alerta de sobretemperatura no campo);

A Tabela 27 exhibe a matriz de experimentos.

Tabela 27 - Matriz de experimentos para o teste da temperatura do rotor

Sequência	Fatores		Saída
	U_f	I_f	$Temp_Rotor$
1	152,7	1400	124,2380952
2	165	1400	153,5238095
3	152,7	1500	100
4	165	1500	127,3333333
5	158,85	1450	125,8390805
6	158,85	1450	125,8390805
7	158,85	1450	125,8390805
8	150,15259	1450	105,8450266
9	167,54741	1450	145,8331343
10	158,85	1379,2893	144,5600178
11	158,85	1520,7107	108,859132
12	158,85	1450	125,8390805
13	158,85	1450	125,8390805
14	158,85	1450	125,8390805

A Tabela 28 apresenta os valores de P para $Temp_Rotor$.

Tabela 28 – Valores-P para $Temp_Rotor$

Termo	Valor-P
<i>Constante</i>	0,000
U_f	0,000
I_f	0,000
U_f*U_f	0,978
I_f*I_f	0,000
U_f*I_f	0,000

Para este teste decidiu-se remover termos não significativos do modelo, e assim, utilizou-se a eliminação *backward*, com α para remoção igual a 0,05, definido previamente. Com isso, eliminou-se a interação “ $U_f \times U_f$ ” das análises gráficas. A Figura 24 demonstra os gráficos de Pareto e Normal de Probabilidade para $Temp_Rotor$.

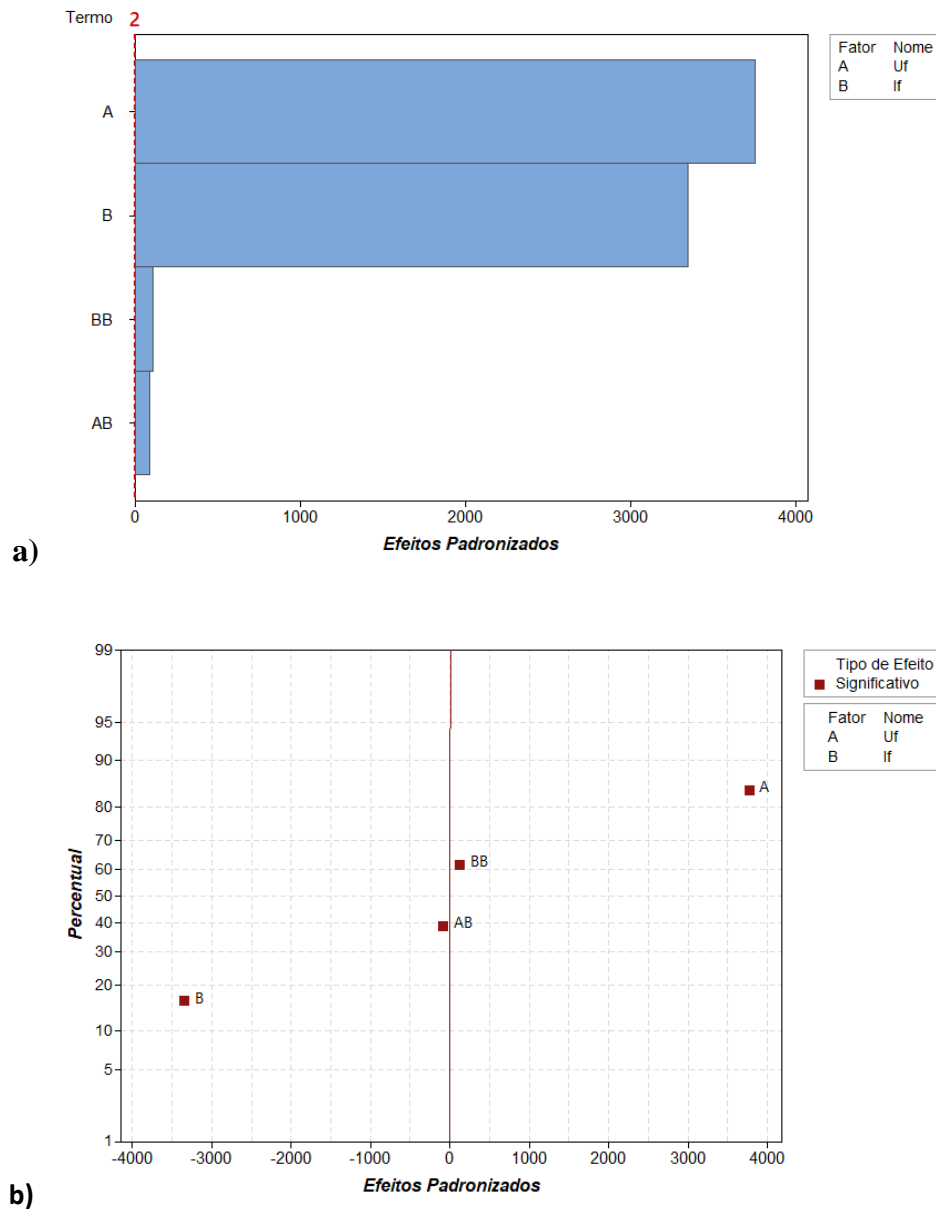


Figura 24 - a) Gráfico de Pareto e **b)** Gráfico Normal de Probabilidade para *Temp_Rotor*.

Assim sendo, observou-se que para *Temp_Rotor*, o fator *Uf* é o mais significativo, seguido por *If*, e das interações $If \times If$ e $Uf \times If$.

Para a representação de superfície, definiu-se por:

- Eixo X: *Uf*
- Eixo Y: *If*
- Eixo Z: *Temp_Rotor*

O modelo correspondente é dado por:

$$\begin{aligned} Temp_Rotor = & 126,61 + (4,6018 \times Uf) - (0,50490 \times If) \\ & + [0,000174 \times (If \times If)] - [0,001587 * (Uf \times If)] \end{aligned} \quad (5.4.2.1)$$

Os valores de temperatura de operação são determinados pelo fabricante, os quais dependem da condição operacional do gerador. Portanto, a linha pontilhada indica a temperatura máxima de operação do rotor (*TetaLim*), estabelecida em 120 °C. A Figura 25 apresenta o Gráfico de Superfície e de Contorno obtidos.

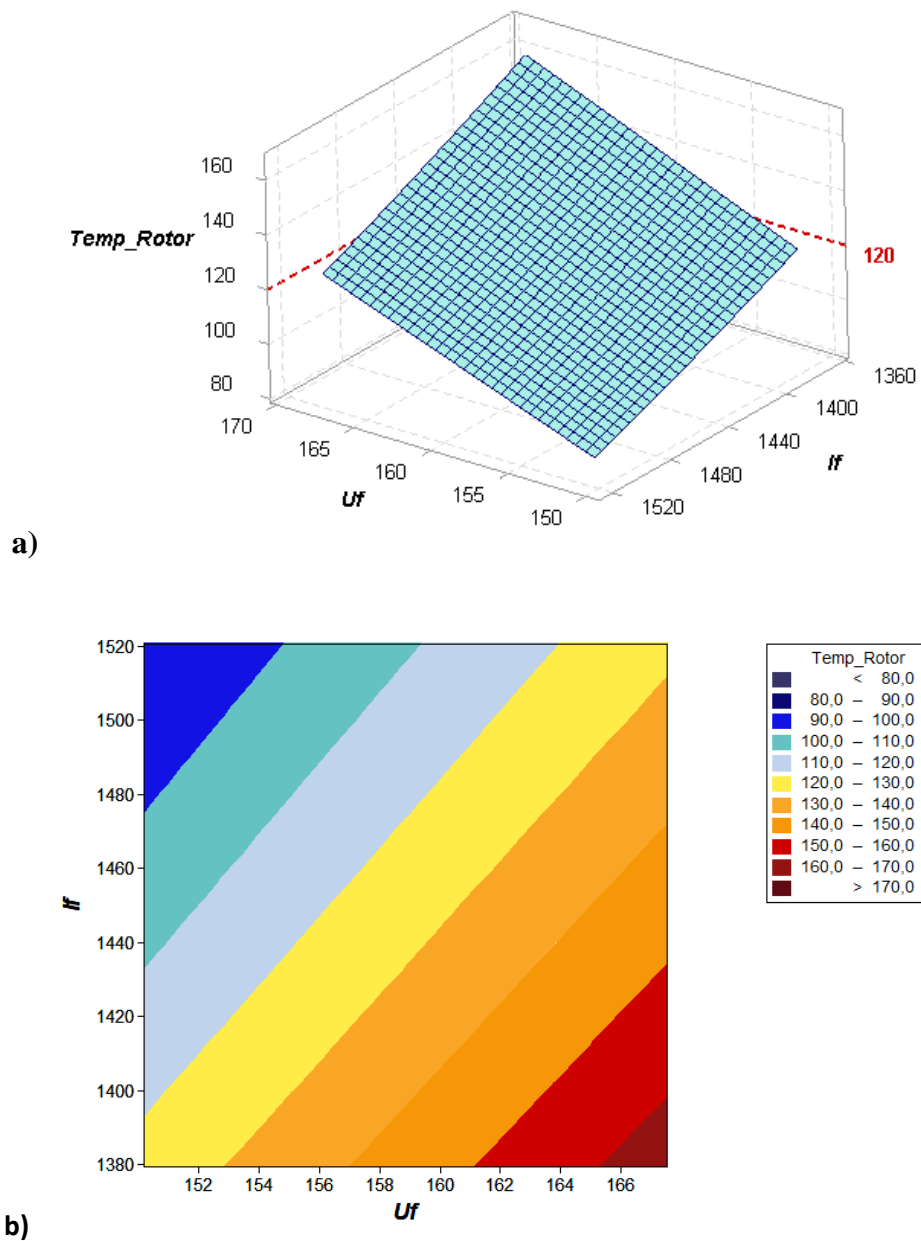


Figura 25 - a) Gráfico de Superfície e b) Gráfico de Contorno para Temp_Rotor.

Portanto, com a definição da superfície e seus respectivos níveis de atuação, decidiu-se também a aplicação da função *desirability*, ou desejabilidade em português. Esta é um dos métodos utilizados no ramo industrial para otimização de processos, ao avaliar as condições de funcionamento e calcular os valores mais desejáveis para as respostas requeridas. O índice global D é definido no intervalo de 0 a 1, e indica que se o valor ficar mais próximo de 1, melhores as respostas estarão de seus limites de especificação.

Assim sendo, com o valor limite de temperatura estipulado pelo alvo, calculou-se os respectivos valores das interações de *Uf* e *If* suportáveis, conforme os dados utilizados para a realização deste experimento. Os efeitos positivos aumentam a resposta quando as definições mudam do valor baixo do fator para o valor alto. Em contrapartida, os efeitos negativos diminuem a resposta quando as definições mudam do valor baixo do fator para um alto. Portanto, em relação à média estabelecida pela variável de saída *Temp_Rotor*, o fator *Uf* têm efeito positivo, enquanto *If* apresenta o contrário.

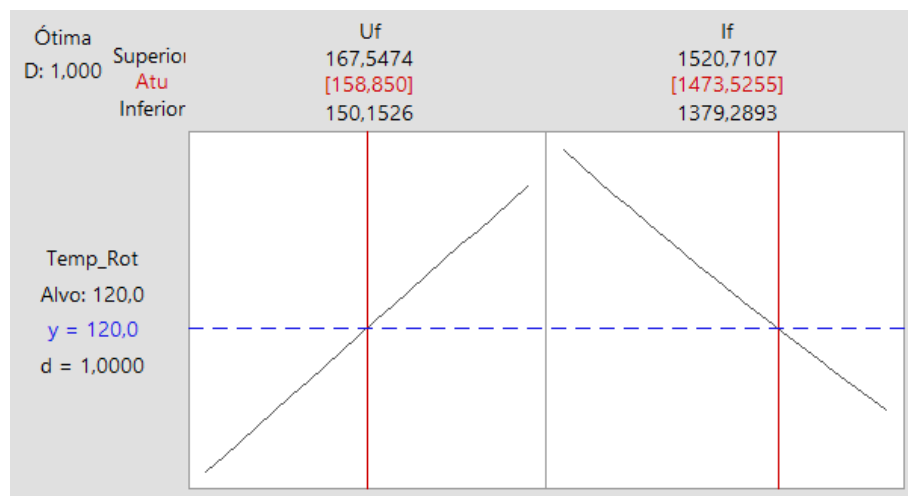


Figura 26 - Gráfico de Otimização para *Temp_Rotor*.

5.4.3 DOE aplicado no Teste de Operação do Circuito Hidráulico

O DOE deste teste é definido pelas variáveis representadas na Figura 15. Entretanto, definiu-se pelo valor de queda bruta (*Delta_H*) constante, logo este também é composto por dois fatores de entrada e uma saída.

Assim, para o sistema hidráulico, se tem:

- 2 fatores de entrada com 2 níveis: *PBit* (potência ativa) e *AbeD* (abertura percentual do distribuidor);
- 1 variável de saída: *Delta_PM* (diferença relativa entre as potências mecânicas)

A Tabela 29 exibe a matriz de experimentos.

Tabela 29 - Matriz de experimentos para o teste da operação do circuito hidráulico

Sequência	Fatores		Saída
	<i>PBit</i>	<i>AbeD</i>	<i>Delta_PM</i>
1	48	23,75	0,0236943
2	58	23,75	0,1436894
3	48	26	0,2132549
4	58	26	0,0148761
5	53	24,875	0,0184075
6	53	24,875	0,0184075
7	53	24,875	0,0184075
8	45,928932	24,875	0,1663051
9	60,071068	24,875	0,0946716
10	53	23,28401	0,1036399
11	53	26,46599	0,1404549
12	53	24,875	0,0184075
13	53	24,875	0,0184075
14	53	24,875	0,0184075

A Tabela 30 apresenta os valores de P para *Delta_PM*.

Tabela 30 - Valores-P para *Delta_PM*

Termo	Valor-P
<i>Constante</i>	0,003
<i>PBit</i>	0,000
<i>AbeD</i>	0,006
<i>PBit*PBit</i>	0,000
<i>AbeD*AbeD</i>	0,000
<i>PBit*AbeD</i>	0,000

A Figura 27 demonstra os gráficos de Pareto e Normal de Probabilidade para *Delta_PM*.

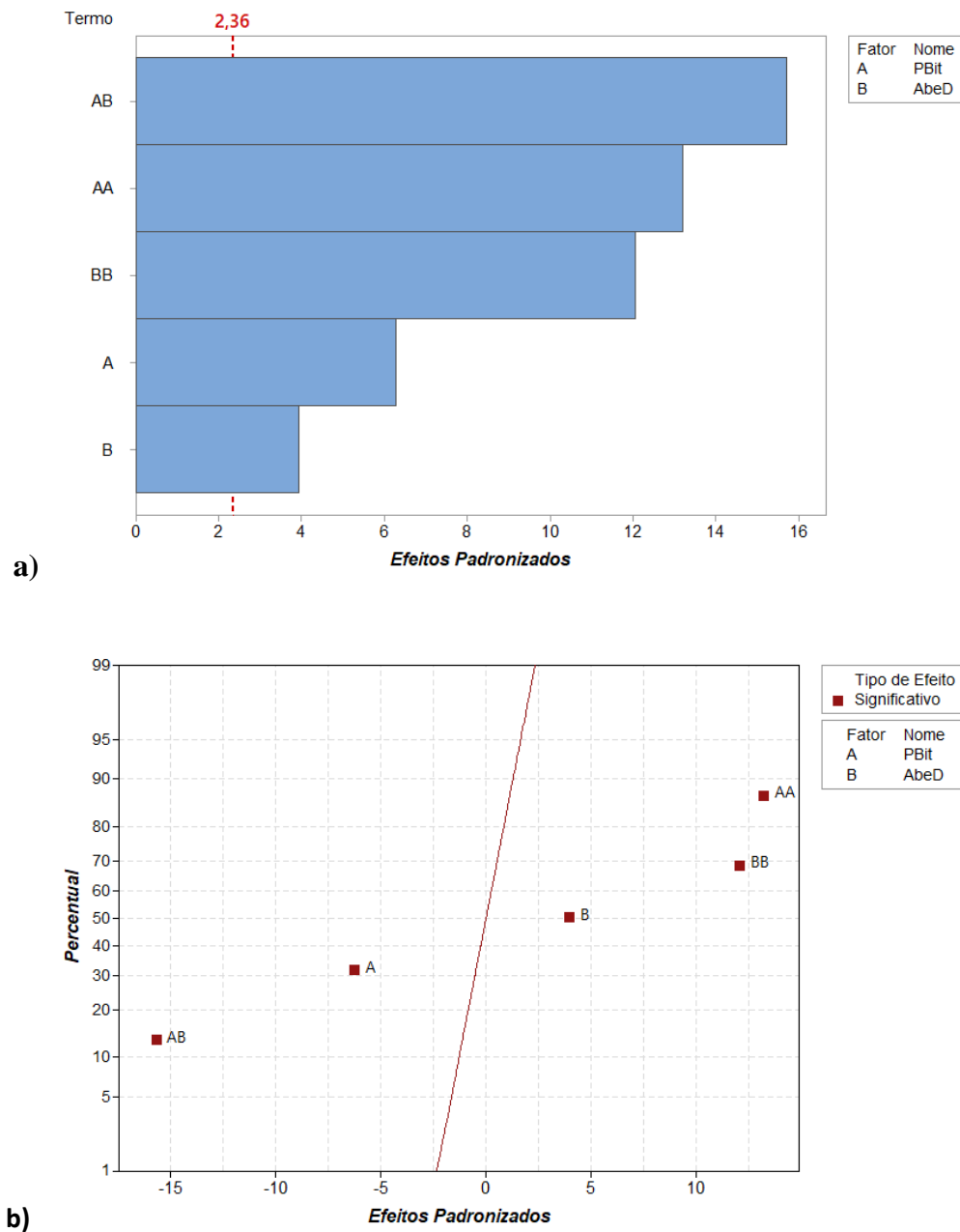


Figura 27 - a) Gráfico de Pareto e b) Gráfico Normal de Probabilidade para Δ_{PM} .

Portanto, têm-se que a interação $PBit \times AbeD$ é a mais significativa, seguida por $AbeD \times AbeD$, $PBit \times PBit$, $PBit$ e $AbeD$. Neste caso, a interação entre os fatores resultou na característica mais relevante, diferentemente dos testes anteriores.

Na aplicação do modelo de superfície de resposta, decidiu-se por:

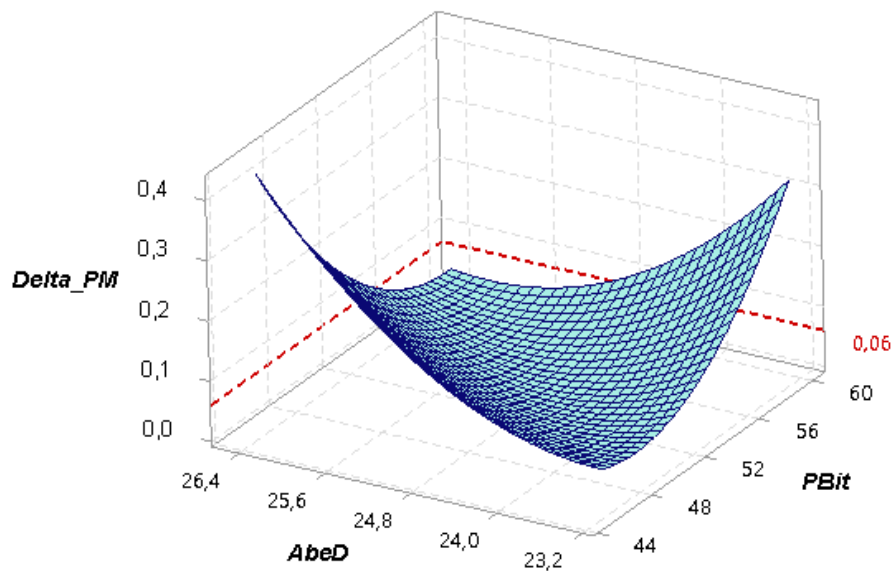
- Eixo X: $PBit$
- Eixo Y: $AbeD$

– Eixo Z: Δ_{PM}

Este é definido por:

$$\begin{aligned} \Delta_{PM} = & 8,8 + (0,1389 \times PBit) - (1,005 \times AbeD) \\ & + [0,001968 \times (PBit \times PBit)] + [0,3553 \times (AbeD \times AbeD)] \quad (5.4.3.1) \\ & - [0,01415 \times (PBit \times AbeD)] \end{aligned}$$

O valor limite para a operação correta do sistema hidráulico é indicado pela linha pontilhada, definido em 0,06 *p.u.* A Figura 28 demonstra os gráficos de Superfície e Contorno obtidos.



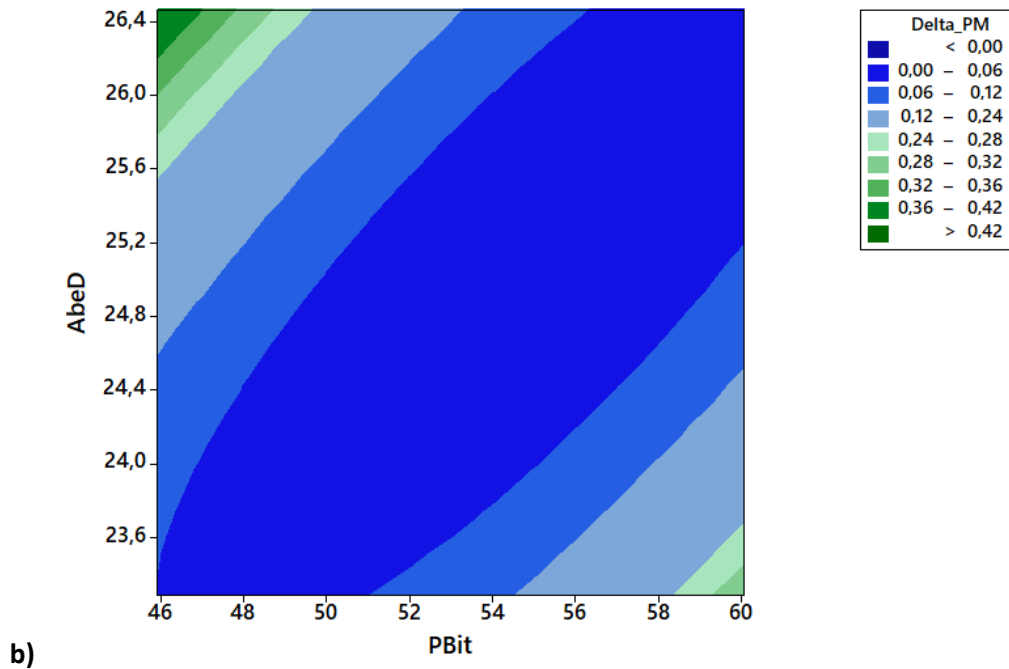


Figura 28 - a) Gráfico de Superfície e **b)** Gráfico de Contorno para *Delta_PM*.

Mediante o valor limite (*Percent_Delta_PM*), se tem os valores das interações de *PBit* e *AbeD* que resultam no alvo estabelecido. A característica dos efeitos individuais das variáveis de entrada é semelhante, entretanto, assim como demonstrado na Figura 27, o fator *PBit* possui mais significância que *AbeD*.

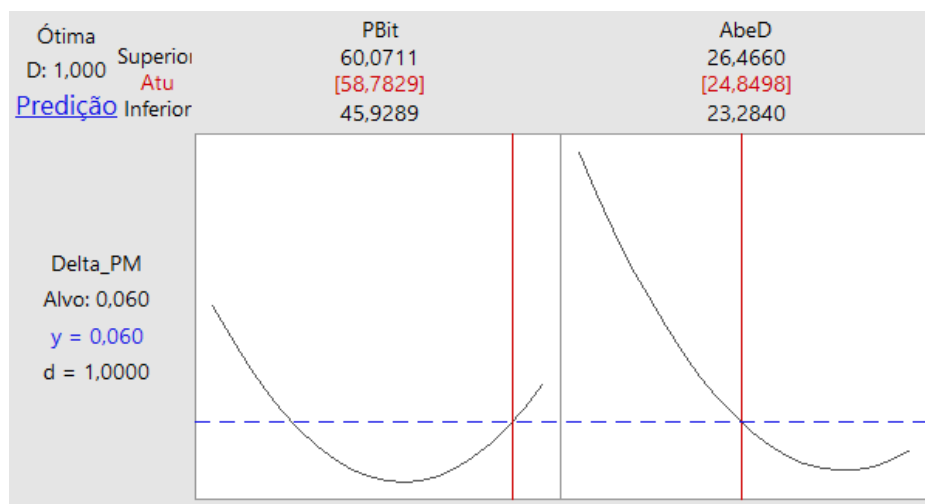


Figura 29 - Gráfico de Otimização para *Delta_PM*.

5.4.4 DOE aplicado no Teste da Operação do Circuito de Magnetização

Na criação do experimento definiu-se pelo método Fatorial Completo. A metodologia DOE para o teste de operação do circuito de magnetização é composta por:

- 4 fatores de entrada com 2 níveis: U_{ab} (tensão entre as fases ab), U_{bc} (tensão entre as fases bc), U_{ca} (tensão entre as fases ca) e I_f (corrente de excitação),
- 1 variável de saída: $Percent_Um$ (problema no circuito de magnetização).

A Tabela 31 exhibe a matriz de experimentos.

Tabela 31 - Matriz de experimentos para o teste da operação do circuito de magnetização

Sequência	Fatores de entrada			Saída	
	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	I_f	$Percent_Um$
1	13600	13248	13500	1400	0,108749876
2	13800	13248	13500	1400	0,113145901
3	13600	13800	13500	1400	0,120778484
4	13800	13800	13500	1400	0,125056934
5	13600	13248	13800	1400	0,115327691
6	13800	13248	13800	1400	0,119659224
7	13600	13800	13800	1400	0,127180583
8	13800	13800	13800	1400	0,131397101
9	13600	13248	13500	1640	0,037662734
10	13800	13248	13500	1640	0,03254454
11	13600	13800	13500	1640	0,023658093
12	13800	13800	13500	1640	0,018676788
13	13600	13248	13800	1640	0,03000433
14	13800	13248	13800	1640	0,024961222
15	13600	13800	13800	1640	0,016204272
16	13800	13800	13800	1640	0,011295072

A Tabela 32 apresenta os valores de P para $Percent_Um$.

Tabela 32 - Valores-P para $Percent_Um$

Termo	Valor-P
<i>Constante</i>	0,000
<i>U_{ab}</i>	0,000
<i>U_{bc}</i>	0,000
<i>U_{ca}</i>	0,000
<i>I_f</i>	0,000

$Uab*Ubc$	0,794
$Uab*If$	0,000
$Ubc*Uca$	0,698
$Ubc*If$	0,000
$Uca*If$	0,000
$Uab*Ubc*If$	0,021
$Ubc*Uca*If$	0,005

A Figura 30 demonstra os gráficos de Pareto e Normal de Probabilidade.

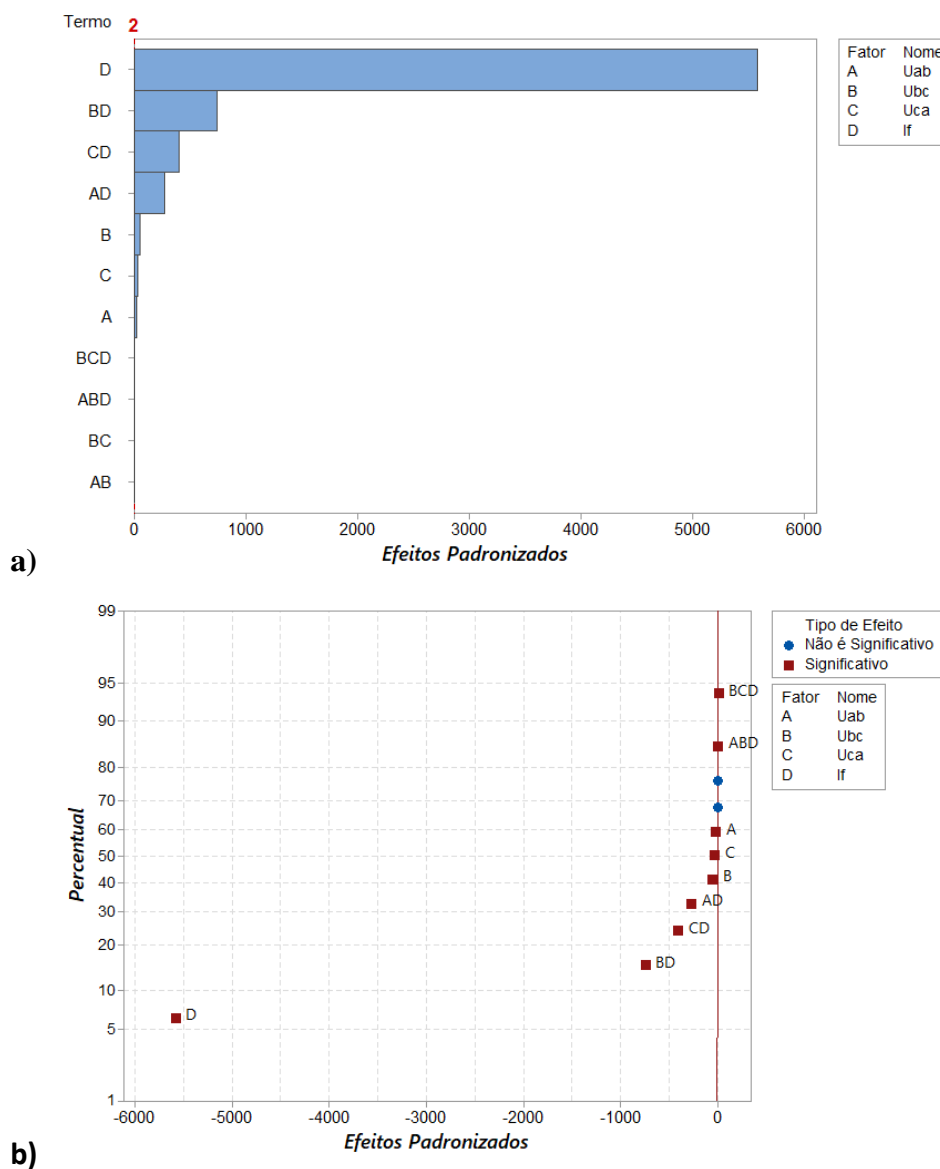


Figura 30 - a) Gráfico de Pareto e b) Gráfico Normal de Probabilidade para Percent_Um.

Assim sendo, observou-se que para *Percent_Um*, o fator *If* é o mais significativo, seguido das interações *Ubc*×*If*, *Uca*×*If*, *Uab*×*If*, *Ubc*, *Uca* e *Uab*. Mediante o valor limite (*Percent_TI*) de 0,03 *p.u.*, se tem os valores das interações de *Uab*, *Ubc*, *Uca* e *If* que resultam no alvo estabelecido. As características dos efeitos individuais das variáveis *Uab*, *Ubc* e *Uca* apresentam pouca variação, em contrapartida, evidencia-se o efeito mais significativo de *If*, apresentado previamente na Figura 30.

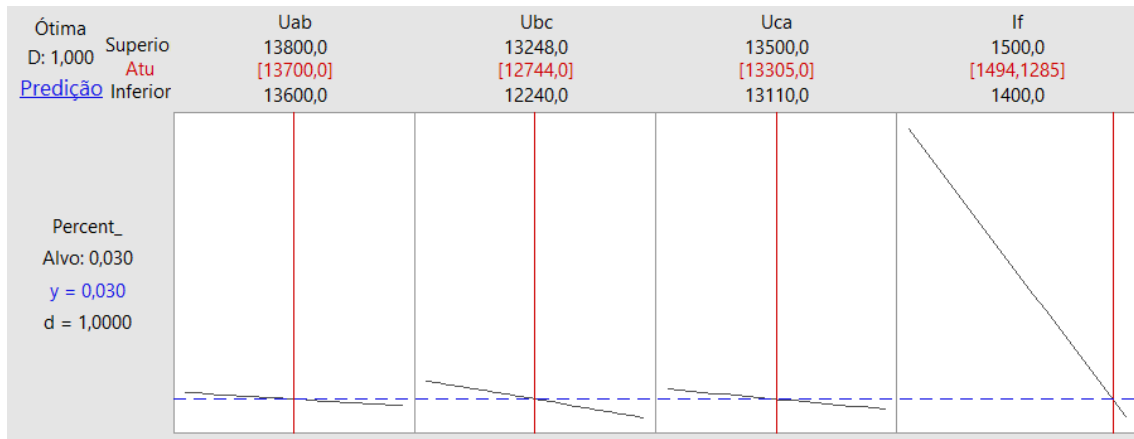


Figura 31 - Gráfico de Otimização para *Percent_Um*.

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho descreveu-se uma metodologia para monitorar geradores e sistemas de excitação, através de diagnósticos preditivos de condições elétricas. Esta consiste no desenvolvimento de modelos virtuais que representem o estado de operação padrão dos equipamentos. Os modelos matemáticos foram desenvolvidos a partir da análise das características eletromagnéticas do gerador e sistema de excitação, coletando informações dos fabricantes, comissionamento e testes de desempenho.

Deste modo, analisaram-se as curvas operacionais de circuito aberto, os valores de potência gerada em função da corrente e tensão de excitação, as características de saturação do gerador e o comportamento do ângulo de disparo dos tiristores. O software com as sub-rotinas de identificação de falhas foi elaborado com a programação em Ladder. O projeto foi implementado nas usinas hidrelétricas de Foz do Chapecó e Campos Novos, localizadas no sul do Brasil.

Aliado aos testes de monitoramento e diagnóstico das condições operacionais do gerador e sistemas de excitação, aplicou-se a técnica Planejamento de Experimentos (*Design of Experiments – DOE*). Este propicia eficiência e economia no processo experimental por meio de métodos estatísticos, e sua análise dos dados obtidos resulta em objetividade científica nas conclusões.

Os Gráficos de Pareto e Probabilidade Normal informam as variáveis mais estatisticamente significativas. Também se adotou pelo emprego do Método de Superfície de Resposta, paralelamente com a de Contorno. Assim, observou-se a área de atuação, e determinou-se os valores das condições operacionais, sendo estas estabelecidos pela equipe de operação e manutenção.

Os testes de monitoramento da temperatura do transformador de excitação, das pontes retificadoras e do núcleo do estator possuem análises diretas para os valores de medição. Uma vez que, em relação a sua respectiva alerta, não se define uma expressão para seu cálculo, portanto nestas não se aplicou o DOE. A tentativa para o teste de monitoramento do sistema de excitação não apresentou assertividade nas interações das variáveis de entrada e saídas.

Os resultados das análises demonstraram a possibilidade de sua utilização, ao contribuir para o planejamento da manutenção do gerador e seus periféricos, especialmente o sistema de excitação. Recomenda-se que, no caso do uso deste trabalho para implementação da tecnologia aqui descrita, se verifique a possibilidade do uso de variáveis disponíveis no supervisório da usina hidrelétrica, facilitando em muito, a obtenção de valores de sinais utilizados no monitoramento.

REFERÊNCIAS

ANEEL, B. D. I. D. G. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. 2018.

ARAÚJO, C. A. S. et al. **Proteção de sistemas elétricos**. Editora Interciência, 2ª edição, Rio de Janeiro, 2005.

ARRIETA, E. M. M. **Estudo do comportamento do Fluxo Magnético de Geradores Síncronos com falhas de curto circuito no rotor usando o Método de Elementos Finitos**. 2017.

BARKER, T. B.; MILIVOJEVICH, A. **Quality by experimental design**. CRC Press, 2016.

CARVALHO, A. R. **Contribuições para projeto de geradores síncronos de grande porte**. 2011.

COELHO, A. L. M. **Um Sistema Integrado de Testes de Funções de Proteção de Geradores Síncronos Associadas aos Limites de Excitação de um Modelo de AVR Implementado em Ambiente de Simulação Digital em Tempo Real**. 2016.

COLOMBARI, R. R. **Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda à projeção**. 2004.

DE FREITAS GOMES, J. H. et al. **Global Criterion Method Based on Principal Components to the Optimization of Manufacturing Processes with Multiple Responses**. *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, v. 58, n. 5, 2012.

DOUGLAS, C. M. **DESIGN AND ANALYSIS OF EXPERIMENTS**. JohnWiley & Sons, 1991.

DUARTE, J. L. B. **Utilização de Técnicas Inteligentes nas Metodologias de Manutenção de Geradores Síncronos**. 2007.

FITZGERALD, A. et al. Tradução Anatólio Laschuk—. **Máquinas Elétricas: Com introdução a eletrônica de potência**. 6ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

GOMES, J. H. D. F. **Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 com utilização de arame tubular inoxidável austenítico**. 2010.

JÚNIOR, N. **LP Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos.** 2003.

KASHIWAGI, F. N. **Estudos em Corte por Plasma usando Delineamento de Experimentos.** 2016.

KLEMPNER, G.; KERSZENBAUM, I. **Operation and maintenance of large turbo-generators.** John Wiley & Sons, 2004.

KOSOW, I. L. **Máquinas elétricas e transformadores.** Globo, 1985.

KOSTENKO, M. I.; PIOTROVSKI, L. M.; RODRIGUEZ, L. G. **Máquinas eléctricas.** 1979.

KUNDUR, P. **Power system stability and control.** 1994.

LIMA, J. M. **Economia do Setor Eletro-Energético Novos Paradigmas.** Apostila Curso de Doutorado–EFEI, Itajubá, 1996.

MACIEL JUNIOR, H. **Uso do planejamento e análise de experimentos no desenvolvimento de um processo de solda por resistência elétrica de pequena escala.** 2011.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control.** John Wiley & Sons (New York), 2009.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; CALADO, V. **Estatística Aplicada E Probabilidade Para Engenheiros.** Grupo Gen-LTC, 2000.

NUNES JÚNIOR, M. A. S. **Análise de sensibilidade das variáveis de influência em afundamentos de tensão utilizando projeto e análise de experimentos (DOE).** 2012.

PAULLILLO, G. **Proposta de um mitigador de harmônicos não característicos através da compensação de desequilíbrios de tensão.** 2001.

SABIONI, R. C. **Otimização de um Processo Industrial de Filagem: uma Comparação entre Métodos Multiobjetivo.** 2018.

SALOMON, C. P. **Contribuições na Aplicação da Análise da Assinatura Elétrica para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos.** 2017.

SEN, P. C. **Principles of electric machines and power electronics**. John Wiley & Sons, 2007.

SILVA, P. A. P. D. **Projeto de parâmetros robustos para um sistema de refrigeração utilizando arranjo combinado de superfície de resposta**. 2016.

TORRES, M. M. **Sistema de monitoramento e diagnóstico de falhas em geradores com sistema de excitação brushless**. 2018.